EL TRANSITO DE VENUS • LOS PRIMEROS NANOCHIPS

INVESTIGACION y CIENCIA

JUNIO 2004
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CELULAS DE LA GLIA

LA CONSTANTE DE HUBBLE Y EL UNIVERSO EN EXPANSION

ALBERTO MAGNO, EL GRAN CURIOSO

LA EVOLUCION CODIFICADA

NANOTUBOS DE CARBONO

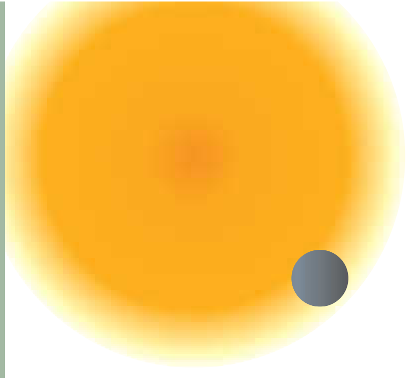




Edición española de
SCIENTIFIC
AMERICAN

Junio de 2004

Número 333



16

El tránsito de Venus

Steven J. Dick

Este mes de junio, cuando Venus cruce ante el disco solar, recordaremos uno de los grandes capítulos de la historia de la astronomía.

24

La elección más justa

Partha Dasgupta y Eric Maskin

Todos los sistemas electorales tienen inconvenientes. Pero al tomar en consideración la forma en que el cuerpo electoral ordena a los candidatos, hay un sistema que refleja mejor que los demás las intenciones del electorado.

38



La constante de Hubble y el universo en expansión

Wendy Freedman

El valor de H_0, la velocidad de expansión del universo, podría, merced a su refinamiento reciente, allanar el camino de la investigación cosmológica.

46

El shock y sus causas

Donald W. Landry y Juan A. Oliver

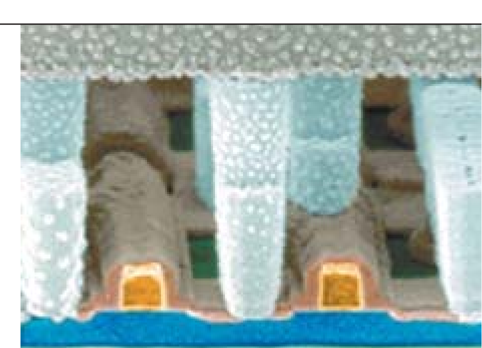
La investigación abre nuevas vías para el tratamiento de este descenso de la presión arterial que a menudo resulta letal.

52

Los primeros nanochips

G. Dan Hutcheson

El constante avance técnico hacia la miniaturización se interna ya en el orden de los nanómetros.



3

HACE...

50, 100 y 150 años.

4

APUNTES

Comportamiento...
Neurología...
Arqueología...
Medio ambiente...
Historia de la ciencia...
Física.

30

CIENCIA Y SOCIEDAD

Cambio climático y distribución geográfica de las especies... Microelectrónica... La falla activa de Padul... Los pájaros de las dehesas.



36

DE CERCA

Ritmo trepidante de la sucesión ecológica en el mar del Norte.





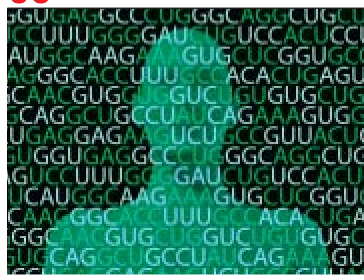
6

Células de la glía

R. Douglas Fields

Tras medio siglo en un segundo plano, la investigación demuestra que las células de la glía intervienen en las sinapsis y desempeñan un papel clave en el aprendizaje y la memoria.

60



La evolución codificada

Stephen J. Freeland y Laurence D. Hurst

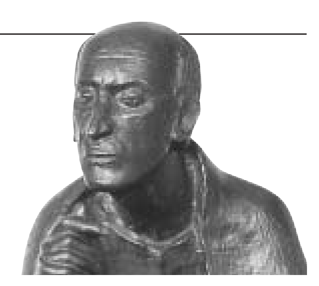
Nuevos descubrimientos concernientes a las reglas que gobiernan la codificación génica de las proteínas han revelado cuán excelente es la "programación" de la naturaleza.

68

Alberto Magno, el gran curioso

Birgit Steib y Roland Popp

En los escritos de este naturalista medieval, que abarcaba el saber de su tiempo, emerge una ciencia orientada hacia la experiencia.

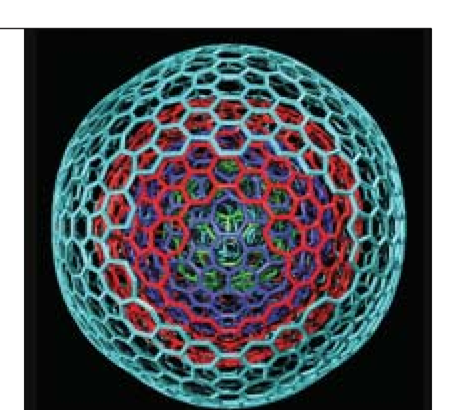


76

Nanotubos de carbono

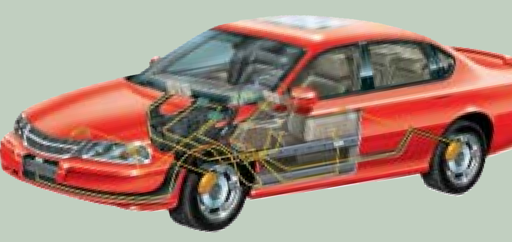
Mauricio Terrones y Humberto Terrones

La versatilidad del carbono le ha permitido adoptar nuevas estructuras nanométricas con propiedades que abren un horizonte inmenso de aplicaciones.



84
JUEGOS MATEMÁTICOS
La paradoja del autostopista, por Juan M.R. Parrondo

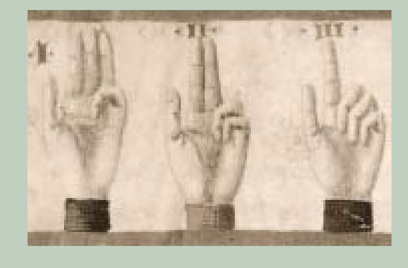
86
IDEAS APLICADAS
Cajas negras en los automóviles, por Mark Fischetti



88
CURIOSIDADES DE LA FÍSICA
Pequeñas cometas, por Wolfgang Bürger



91
LIBROS
Socialización de la ciencia, Epoca medieval.



96
AVENTURAS PROBLEMÁTICAS
Faroltesta, por Dennis E. Shasha



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Felipe Cortés: *Células de la glía*; Luis Bou: *El tránsito de Venus, La elección más justa, La evolución codificada* y *Aventuras problemáticas*; Ramón Pascual: *La constante de Hubble y el universo en expansión*; Esteban Santiago: *El shock y sus causas*; Antonio Prevosti Monclús: *Alberto Magno, el gran curioso*; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Jeff Johnson, *Hybrid Medical Animation*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

MIEDO A LA VACUNA. «Tras varias semanas de confusión acerca de la peligrosidad de la nueva vacuna contra la poliomielitis, el mes pasado se pusieron en marcha ensayos masivos. Walter Winchell había dicho a su audiencia radiofónica que la vacuna ‘podría resultar mortal’, pues en una partida se habían hallado virus vivos. La Fundación Nacional para la Parálisis Infantil, que dirige y costea la prueba, se apresuró a explicar que tres laboratorios comprueban cada partida de vacunas. Señaló la fundación que Jonas Salk, el creador de la vacuna, había suministrado el preparado comercial a más de 4000 niños de Pittsburgh, y ninguno de ellos había mostrado efectos adversos.»

CÉLULA SOLAR DE SILICIO. «Los laboratorios Bell dieron a conocer la semana pasada una pequeña oblea de silicio adulterado que convierte la luz solar directamente en energía eléctrica. Esa batería deriva de las investigaciones sobre los transistores. “Funciona con un rendimiento del 6 por ciento, pero los científicos de Bell creen que esa cifra puede aumentar hasta el 10 por ciento. No es verosímil que el dispositivo pueda sustituir a las grandes centrales eléctricas —una batería de 30.000 kilowatt ocuparía unas 40 hectáreas—, pero la compañía espera que sea útil como pequeña fuente de alimentación, por ejemplo para los sistemas telefónicos rurales.»

...cien años

EL GRAN CAÑÓN. «Con la previsión y liberalidad que desde el principio han caracterizado a nuestro gobierno, va a tomar el Gran Cañón del río Colorado, en Arizona, bajo su cuidado y custodia. Topógrafos oficiales ya han levantado planos de una zona del cañón. Completar el trabajo requerirá más de un año. Para los geólogos, el cañón brinda un campo de estudios cada vez más variado e inacabable. Para los amantes del paisaje y de los aspectos más tremendos y sobrecogedores de la naturaleza, no hay en el mundo una maravilla como ésa.»

INVESTIGACIÓN AERONÁUTICA. «La máquina voladora invención de Orville y Wilbur Wright, que en diciembre pasado realizó con éxito un vuelo en Kitty Hawk (Carolina del Norte), hizo otro intento el pasado 26 de mayo en Dayton (Ohio), que según los hermanos también fue afortunado. Se mantuvo la prueba en gran secreto, y sólo unos pocos han podido ser testigos. La máquina, propulsada a lo largo de unos treinta metros de pista, se elevó en el aire, voló una corta distancia y cayó. Esto se debió, según los inventores, a una avería del motor de gasolina que suministra la potencia. En la caída se rompieron las hélices y no pudo repetirse la prueba.»

OSADOS DE LA BICI. «En la actividad de rizar el rizo en bicicleta, que tanto se ha popularizado últimamente, los ciclistas han desarrollado un ardor sin duda digno de mejor causa. La última novedad es el invento de un ingenioso ciclista de Berlín, de apellido Böttner, que ha construido un rizo doble (*véase ilustración*). Imagínese a qué velocidad el ejecutante debe lanzarse para atravesar los dos rizos. Acaso les sea posible apreciar el estoico sosiego de sus nervios.»

...ciento cincuenta años

YAKS. «Geoffrey Saint-Hilaire y otros eminentes naturalistas franceses están considerando la domesticación de animales que hasta ahora se conocían en Europa sólo como objetos de curiosidad científica. Recientemente, se han recibido unos cuantos ejemplares de yak procedentes de China y destinados al *Jardin des Plantes;* según el conde de Buffon (1707-1788), ese animal ‘es más precioso que todo el oro del Nuevo Mundo’. En Tibet y China tira de pesadas cargas, da leche, ofrece una carne excelente y un pelo que puede transformarse en prendas de abrigo. Por consiguiente, aclimatarlo a Europa sería un inmenso servicio a la humanidad. Por cierto: el difunto lord Derby lo intentó y fracasó.»



Locos por la bicicleta. Acrobacias en Berlín, 1904.

APUNTES

COMPORTAMIENTO

Apetito reformable

La sensibilidad innata a la leptina, una hormona supresora del apetito, parece mantener el peso corporal en torno a un “valor prefijado”. Hay ahora pruebas que indican que la leptina realmente programa y reprograma los circuitos cerebrales contenidos en el núcleo arqueado, zona del hipotálamo reguladora del apetito. Se ha descubierto que los cerebros de ratones obesos deficientes en leptina poseen más conexiones estimuladoras que los ratones normales con las neuronas promotoras de la nutrición y el engorde, y menos con las neuronas que contrarrestan esas tendencias. Administrando leptina a los ratones se restablece el equilibrio entre las conexiones, antes incluso de que reduzca el apetito y el peso; una hormona estimuladora del apetito produce el efecto contrario. También se ha visto que las células del núcleo arqueado de los ratones deficientes en leptina tienen menos ramificaciones. Administrándosela justo al nacer se consigue el mismo efecto que con una descarga natural de la sustancia y se restablece el desarrollo normal; pero suministrada en la edad adulta, carece de efectos sobre el número de ramas. Parece que la leptina y la nutrición de las primeras dos o tres semanas de vida tienen efectos a largo plazo sobre el desarrollo del cerebro.



BURSTEIN COLLECTION/*Corbis*

—J. R. Minkel

NEUROLOGIA

No damos más de sí

Quizá se trate de una mala noticia, pero esa frase que suele oírse, que sólo usamos el diez por ciento del cerebro, no es cierta. La neurología no ha encontrado ninguna vasta reserva de capacidad cerebral que podamos explotar. Y ninguna sustancia de potenciación cerebral puede suplir a la práctica y el esfuerzo. Para empezar, el cerebro fue configurado por la selección natural. El tejido cerebral es caro metabólicamente; cuesta creer que la evolución hubiese permitido semejante desperdicio de capacidad. La neurología clínica aporta otra prueba: perder nueve décimas partes del cerebro es una catástrofe; perder cualquiera de sus partes causa una u otra minusvalía. La estimulación eléctrica de puntos del cerebro no ha descubierto áreas latentes que, pese al estímulo, no susciten emociones, movimientos o percepciones (cabe probarlo con pacientes sometidos sólo a anestesia parcial porque el cerebro carece de receptores del dolor). Las diversas técnicas de formación de imágenes han localizado un sinfín de funciones psicológicas en centros y sistemas específicos del cerebro. Nunca se ha hallado un área dormida a la espera de que se le asigne una tarea nueva.

—Barry L. Beyerstein
Universidad Simon Fraser
de Vancuver

ARQUEOLOGIA

Los primeros gatitos

Una necrópolis chipriota ofrece pruebas fundadas de que no fue la egipcia la primera civilización que domesticó los gatos. Otra lo logró cinco mil años antes. Unos investigadores dirigidos por Jean-Denis Vigne, del Museo Nacional de Historia Natural de París, hallaron el esqueleto completo de un gato de ocho meses yaciendo a menos de cuarenta centímetros de los huesos de una mujer de 30 años. Ambos conjuntos de restos estaban en el mismo sedimento y mostraban el mismo grado de conservación, lo que sugiere que el felino y el ser humano fueron enterrados juntos hace 9500 años. Así pues, parece evidente que la domesticación de los gatos tuvo lugar unos 3000 años después que la de los perros y muy cerca de la época en que se iniciaron el cultivo de la tierra y la cría de animales; por entonces, los gatos habrían resultado útiles para proteger los almacenes de grano de los ratones. *—Philip Yam*



PHILIP YAM

La compañía mutua entre gatos y humanos empezó mucho antes de lo que se creía.

MEDIO AMBIENTE

Centrales eléctricas cloacales

En EE.UU. se tratan a diario unos 125 millones de metros cúbicos de aguas residuales con un costo anual superior a 25.000 millones de dólares. La microbiología podría aliviar ese gasto generando electricidad en la depuración de las aguas negras. Se llena de agua una pila de combustible que lleva electrodos de grafito y una membrana catalítica de carbono, plástico y platino. Los gérmenes contenidos en el cieno cloacal generan electrones libres cuando sus enzimas descomponen los azúcares, las proteínas y las grasas. En los experimentos, este dispositivo generó una potencia de 10 a 50 miliwatt por metro cuadrado de superficie de electrodo (un 5 por ciento de la potencia necesaria para encender una bombilla de árbol de Navidad). Mientras, esta pila eliminaba hasta un 78 por ciento del cieno orgánico del agua. El aparato, del tamaño de una mano, podría incorporar otros materiales para generar una potencia de 10 a 20 veces mayor.

—*Charles Choi*



LESTER LEFKOWITZ *Corbis*

Adecuadamente tratadas, las aguas residuales podrían ser una fuente de electricidad.

HISTORIA DE LA CIENCIA

Política científica

Freeman J. Dyson fue, con Feynman, Schwinger y Tomonaga, uno de los constructores de la electrodinámica cuántica, el principal avance de la física de partículas en la segunda posguerra mundial. El principal avance, pero no un avance revolucionario, según explica en una reseña que ha publicado en la *New York Review of Books* del último libro del teórico de cuerdas Brian Greene. Sorprenderá a quien haya conocido personalmente a Feynman que se le llame conservador, escribe; sin embargo, pese a su "maravillosa originalidad" lo era, al menos en cuanto físico. El propio Dyson tiene fama de original, y también se considera conservador. Concibe la historia de la ciencia como una tensión entre revolucionarios y conservadores. Su generación fue conservadora al ver que los revolucionarios de la generación anterior, Einstein, Heisenberg, Schrödinger, Dirac, seguían siéndolo pasado un cuarto de siglo y "se ponían en ridículo". Los creadores de la electrodinámica cuántica aceptaron la física que había, la mecánica cuántica —fruto, eso sí, de una genuina revolución—, y se limitaron a solventar problemas en ella, en vez de inventar una física nueva. Ahora, otra generación vuelve a la revolución, en este caso la de la teoría de cuerdas. También hay una vía conservadora hacia la extravagancia. Dyson la recorre conscientemente. Le desagrada el reductivismo cuántico de la teoría de cuerdas y le niega sentido a su objetivo final, la cuantización de la gravedad, porque, sostiene, la gravedad es clásica y sólo clásica. Deriva esta afirmación de una conjetura: que en la naturaleza todo conspira para que el gravitón, el cuanto de la gravedad, no sea observable, y si por principio no es observable, no es real, como el éter prerrelativista. Pero Rutherford pensaba que los físicos cuánticos sólo "jugaban con símbolos" y Dirac no aceptaba la electrodinámica cuántica por lo fea que le parecía. Dyson mismo nos lo recuerda.

FISICA

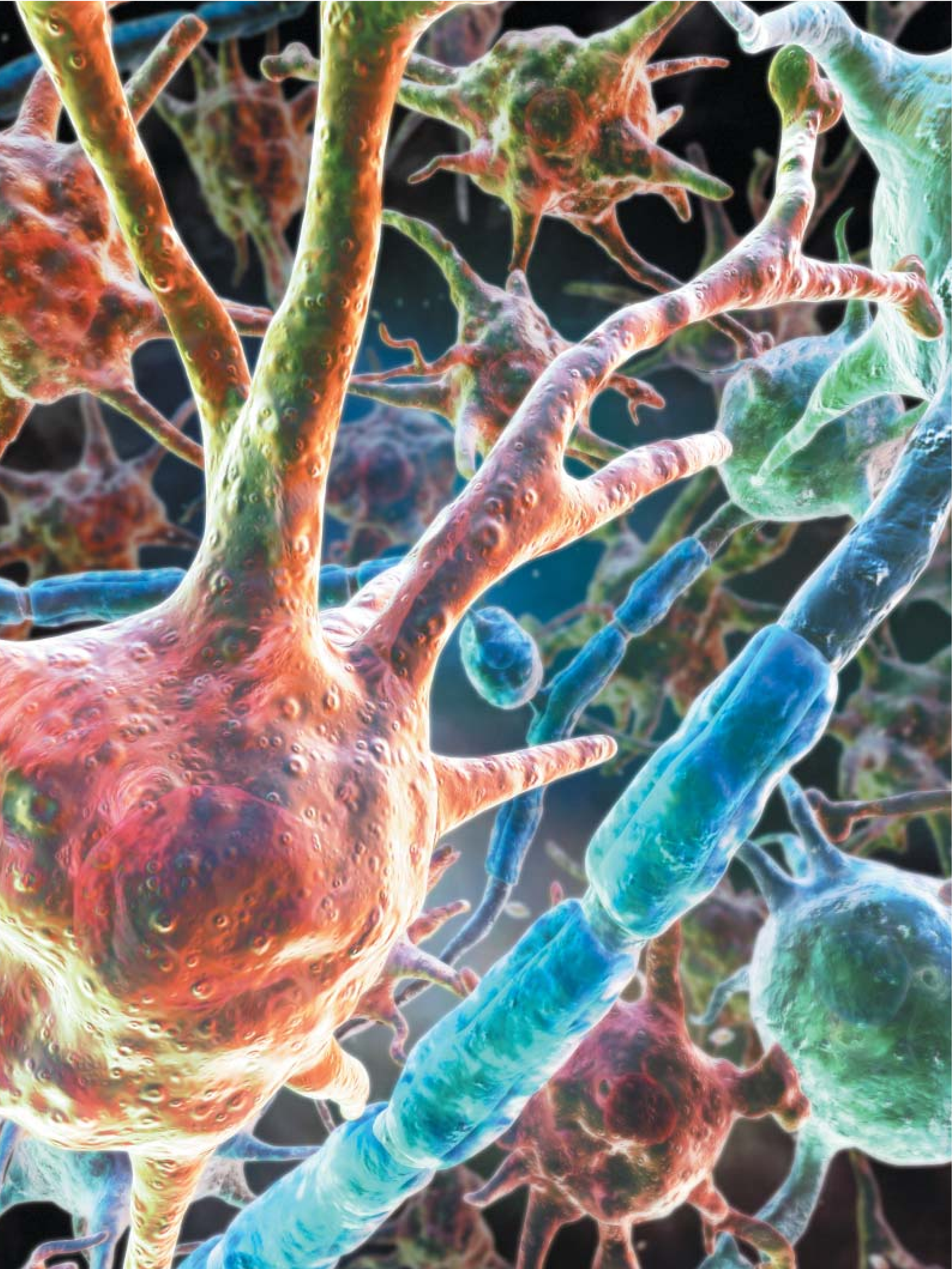
Cómo se pesa la Tierra con una báscula

O, más bien, cómo se determina su masa. Pero, aun así, una báscula de baño sirve para la tarea. En física, problemas complicados pueden resumirse en una fórmula sencilla; en este caso, $g = G \times$ (masa de la Tierra)/(distancia al centro de la Tierra)^2. La aceleración de un cuerpo a causa de la fuerza de la gravedad, g, depende de la masa del objeto que lo atraiga. Tras muchos decenios de experimentos sabemos que G, la constante de la gravedad, vale $6{,}67 \times 10^{-11}$ ($m^3 kg^{-1} s^{-2}$), con m en metros, kg en kilogramos y s en segundos. Y sabemos también a qué distancia nos hallamos en la superficie del planeta de su centro: 6371 kilómetros. Para pesar la Tierra, basta tirar la báscula por la ventana, contar cuántos segundos tarda en estrellarse contra el suelo, medir la altura a que está la ventana y calcular con esos dos números cuánto vale g mediante la fórmula *altura* = $1/2g$ (*tiempo que tarda en llegar al suelo*)^2. Nos saldrá 9,8 metros por segundo cada segundo. Estos valores de g, G y la distancia al centro de la Tierra nos darán una masa de la Tierra de 6×10^{24} kilogramos.



NASA

—*Michael Wysession*
Universidad de Washington



Células de la glía

Tras medio siglo en un segundo plano,
la investigación demuestra que las células de la glía
intervienen en las sinapsis y desempeñan un papel clave
en el aprendizaje y la memoria

R. Douglas Fields

*Driving Mr. Albert***,** libro de reciente aparición, cuenta la historia de Thomas Harvey, patólogo que, en 1955, realizó la autopsia de Albert Einstein. Concluida su tarea, decidió llevarse el cerebro del genio a casa. Allí, flotando en el interior de un recipiente de plástico, permanecería 40 años. En varias ocasiones, Harvey repartió finos cortes del cerebro a científicos y seudocientíficos de todo el mundo, quienes estudiaron el tejido en busca de pistas que explicaran la genialidad de Einstein. Cuando Harvey llegó a los ochenta, colocó lo que quedaba del cerebro en el maletero de su Buick Skylark y cruzó el país para devolvérselo a la nieta de Einstein.

Uno de los científicos que examinaron cortes del preciado cerebro fue Marian C. Diamond, de la Universidad de California en Berkeley. No encontró nada especial en el número o el tamaño de las neuronas. Sin embargo, en el córtex de asociación, responsable de la cognición de alto nivel, halló una cifra elevadísima de las células de la glía: una concentración mucho mayor que la del promedio de su encéfalo.

¿Mera rareza? Quizá no. Cada vez existen más pruebas que sugieren que las células gliales desempeñan un papel mucho más importante del que se ha venido suponiendo. Durante decenios, los fisiólogos dirigieron su atención hacia las neuronas, consideradas fundamentales para la comunicación cerebral. A la glía, en cambio, pese a superar en número a las neuronas en una proporción de nueve a uno, se le atribuía sólo una labor de mantenimiento: transportar nutrientes desde los vasos sanguíneos hasta las neuronas, mantener un buen equilibrio iónico y proteger de los agentes patógenos que consiguen eludir el sistema inmunitario. Con el sostén de la glía, las neuronas se hallarían libres para comunicarse entre sí a través de las sinapsis y establecer una red de conexiones que nos permiten pensar, recordar y saltar de alegría.

Este modelo de la función cerebral, que ha perdurado largo tiempo, podría cambiar drásticamente si se confirman las nuevas hipótesis sobre la glía. En los últimos años, las nuevas técnicas de formación de imágenes han mostrado que las neuronas y la glía participan en un diálogo de doble sentido, desde el desarrollo embrionario hasta la vejez. La glía influye en la formación de las sinapsis y ayuda a determinar qué conexiones neuronales se refuerzan o se debilitan con el tiempo; tales cambios resultan esenciales para el aprendizaje y la memoria a largo plazo. Las investigaciones más recientes demuestran que las células de la glía se comunican también entre ellas mediante una red distinta de la neuronal, aunque paralela a la misma, red que influye en la operación correcta del cerebro. Se dibuja así un panorama excitante y prometedor: más

1. LAS CELULAS GLIALES (*en rojo*) superan a las neuronas en una proporción de nueve a uno, lo mismo en el cerebro que en el resto del sistema nervioso.

JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*



de la mitad del cerebro, inexplorada durante medio siglo, puede encerrar una valiosa información sobre el funcionamiento de la mente. Con todo, los neurobiólogos prefieren actuar con cautela y no precipitarse en la asignación de un nuevo protagonismo a la glía.

“Escuchas” neuronales

Solemos asociar el sistema nervioso a una maraña de hilos que enlazan unas neuronas con otras. Cada neurona se prolonga en su axón, que transmite señales eléctricas a sus botones terminales. Cada botón libera neurotransmisores —mensajeros químicos— a través de una pequeña hendidura sináptica hasta un receptor en forma de ramita, la dendrita, que pertenece a una neurona adyacente. Rodeando a neuronas y axones encontramos un conjunto variado y numeroso de células de la glía. A mediados de los cincuenta del siglo pasado, los neurobiólogos sospechaban ya que las células gliales podrían contribuir al procesamiento de la información, pero no pudieron corroborarlo. Con el tiempo, se fue abandonando esa línea de investigación. La glía pasó a segundo término.

Se fracasó en detectar la función señalizadora de esas células, en parte, porque se carecía de las técnicas analíticas pertinentes, pero sobre todo porque se buscaba en el sitio equivocado. Se supuso, erróneamente, que si la glía pudiera establecer una comunicación, se serviría del mismo mecanismo eléctrico empleado con ese fin por las neuronas. Es decir, las células de la glía generarían potenciales de acción (pulsos eléctricos) que provocarían finalmente la liberación de neurotransmisores a través de sinapsis, excitando con ello la actividad eléctrica de otras células. De hecho, se descubrió que en la glía había canales iónicos sensibles al voltaje, iguales que los que generan señales eléctricas en los axones; pero se creía que tales canales se limitaban a registrar indirectamente el nivel de actividad de las neuronas vecinas. Se observó, asimismo, que la membrana de las células gliales carecía de las propiedades que se requieren para propagar sus propios potenciales de acción. Nadie advirtió, sin embargo, y eso es precisamente lo que las técnicas avanzadas de formación de imágenes nos han revelado, que la glía no se sirve de señales eléctricas, sino químicas, para transmitir mensajes.

A mediados de los años noventa, se introdujeron nuevos enfoques sobre la detección de la actividad neuronal por las células de la glía. Se apoyaban en la observación de que las células gliales presentaban un repertorio de receptores en sus membranas, capaces de responder a un amplio abanico de moléculas, incluidos, en algunos casos, neurotransmisores. Este descubrimiento indujo a pensar que la glía podría comunicarse utilizando señales químicas que las neuronas no reconocían y, a la vez, reaccionar ante neurotransmisores liberados por neuronas.

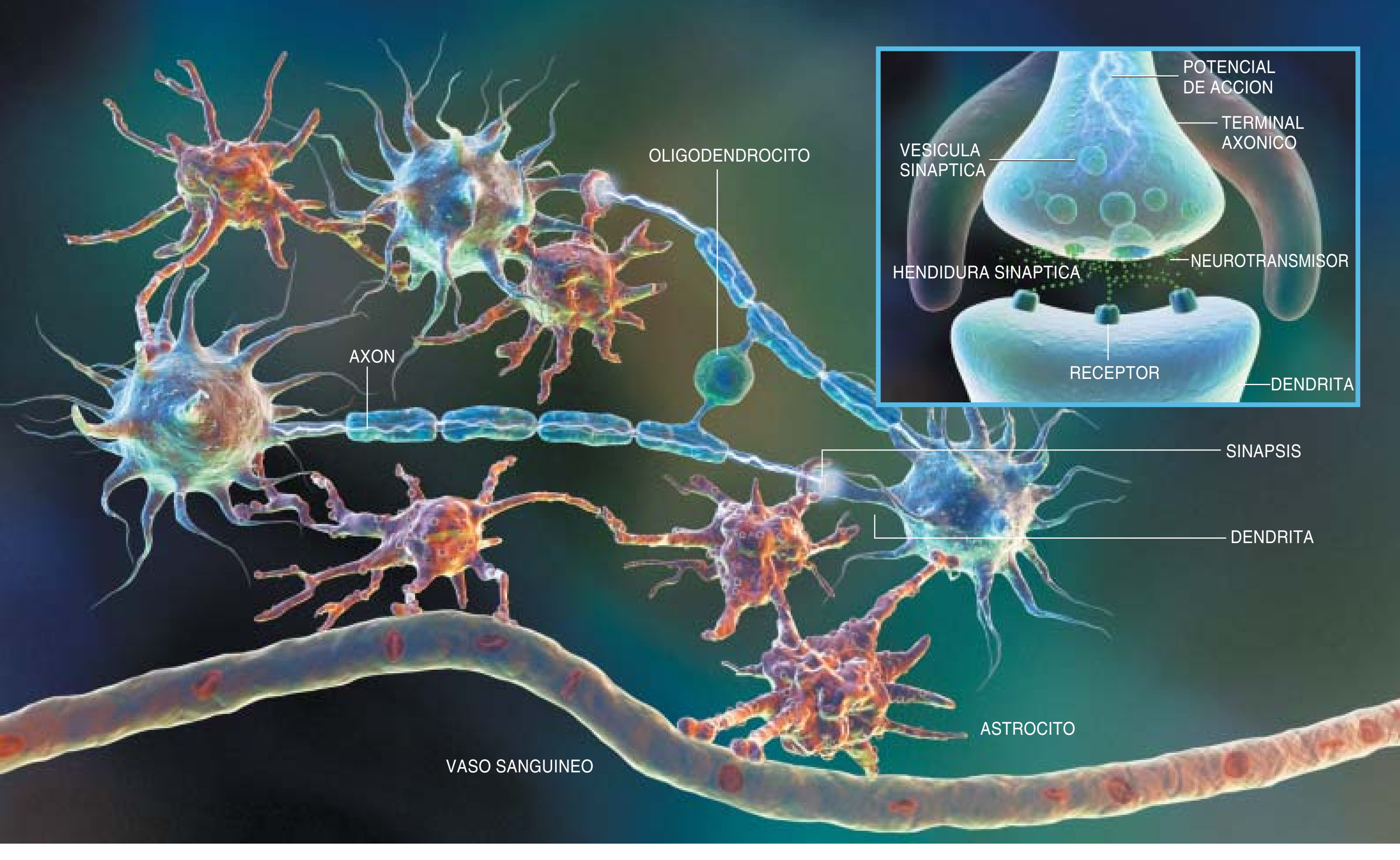
Para someter a prueba tal hipótesis, hubo que empezar por demostrar que las células de la glía realmente “escuchan” lo que las neuronas “se cuentan” entre sí y modifican su comportamiento en función de lo que “oyen”. En trabajos realizados con anterioridad se había puesto de manifiesto que una entrada de calcio en las células gliales podría constituir una señal de que habían sido estimuladas. A partir de este dato, se diseñó un método para ver si las células terminales de Schwann —células gliales que rodean las sinapsis allí donde los nervios establecen contacto con las células musculares— eran sensibles a las señales neuronales emitidas en dichas uniones: la técnica de formación de imágenes por calcio. El método, en efecto, permitió confirmar que las células de Schwann, al menos, respondían a la descarga sináptica y que dicha respuesta implicaba una entrada masiva de iones calcio en las células.

Otras células de Schwann cumplen una función más general que la sináptica que acabamos de indicar: rodean a los axones a lo largo de los nervios del cuerpo. Los oligodendrocitos, otro tipo de células gliales, envuelven los axones del sistema nervioso central (cerebro y médula espinal). Desde nuestro laboratorio, en los Institutos Nacionales de la Salud (NIH), nos planteábamos si la glía era capaz de registrar la actividad neuronal en cualquier sitio donde ésta fluyese a través de los axones. De ser así, ¿qué mediaba esa comunicación? Y, más importante aún, ¿qué efecto tenía sobre la glía lo que sus células “oían”?

Para encontrar las respuestas, cultivamos neuronas sensoriales (células del ganglio de la raíz dorsal) de ratón en placas equipadas con electrodos que nos permitirían disparar potenciales de acción en los axones. A unos cultivos añadimos células de Schwann; a otros, oligodendrocitos.

Resumen/Glía

- Durante decenios se han venido atribuyendo a las neuronas las comunicaciones desarrolladas en el cerebro y el sistema nervioso. A las células gliales se les relegaba en funciones tróficas, pese a superar la cuantía de las neuronas en una proporción de nueve a uno.
- Las nuevas técnicas de formación de imágenes y los instrumentos de detección de señales revelan ahora que las células de la glía se comunican entre sí y con las neuronas a propósito de los mensajes que cursan por la red neuronal. La glía puede modificar tales señales en los hiatos sinápticos que separan las neuronas; pueden incluso determinar el punto de formación de sinapsis.
- Dada esta especialización, la glía podría desempeñar un papel crítico en el aprendizaje y la formación de recuerdos, así como en la reparación del tejido nervioso. Para comprobarlo se han pergeñado diversos experimentos.



JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*

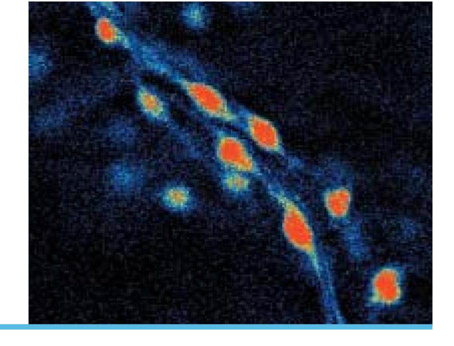
2. GLIA Y NEURONAS operan juntas en el cerebro y la médula espinal. La neurona envía un mensaje a lo largo del axón, que, a través de la hendidura sináptica, pasa a una dendrita de otra neurona. Los astrocitos de la glía, que aportan nutrientes a las neuronas, rodean y regulan las sinapsis. Los oligodendrocitos producen la mielina que aísla los axones. Cuando el mensaje eléctrico de una neurona (potencial de acción) alcanza el terminal axónico (*recuadro*), el mensaje promueve el movimiento de las vesículas hacia la membrana; se abren y liberan neurotransmisores (moléculas de señalización) que cursan a través de la angosta hendidura sináptica y se encaminan hacia los receptores de la dendrita. Principios similares operan en el sistema nervioso periférico, con la diferencia de que son las células de Schwann las encargadas de la mielinización.

Necesitábamos registrar de forma independiente la actividad de los axones y la de la glía, para determinar si esta última detectaba los mensajes del axón. Por ello utilizamos la técnica de formación de imágenes del calcio, que muestra la evolución del medio celular mediante el uso de un colorante que emite fluorescencia cuando se enlaza con iones calcio. Cuando un axón transmite una señal eléctrica, en la membrana de la neurona se abren canales iónicos sensibles al voltaje y se facilita así la entrada de iones calcio. Cabría, pues, esperar que se percibiera el impulso eléctrico a través de un destello de fluorescencia, verde, que iluminara toda la neurona desde su interior. Conforme aumentase la concentración de calcio en una célula, la fluorescencia brillaría más. Su intensidad podría medirse con un tubo fotomultiplicador; las imágenes de las células destellantes podrían digitalizarse y mostrarse en falso color y en tiempo real, en un monitor (algo parecido a las imágenes de radar de las tormentas que ilustran los informes sobre el tiempo). Si las células gliales se percatasen de las señales de las neuronas y lo hiciesen en parte absorbiendo calcio de su microentorno, también refulgirían, aunque más tarde.

En la sala a oscuras, fija la mirada en la pantalla del ordenador, Beth Stevens y yo nos disponíamos a recibir la confirmación, preparada durante tres meses, de nuestra hipótesis. Cuando encendimos el estimulador, las neuronas ganglionares de la raíz dorsal respondieron al instante: mudaban del azul al verde, después al rojo y luego al blanco en una escala de falsos colores correspondiente a la concentración de calcio, a medida que el ion penetraba en los axones. Al principio no experimentaban cambio alguno las células de Schwann ni los oligodendrocitos; pero al cabo de unos 15 segundos, las células gliales empezaron de repente a encenderse, como bombillas en un árbol navideño. Estas células habían detectado el impulso eléctrico en los axones y respondían aumentando la concentración de calcio en su propio citoplasma.

Comunicación glía-glía

Habíamos comprobado que las células de la glía detectan la actividad axónica mediante la absorción de calcio. En las neuronas, el calcio activa enzimas que sintetizan neurotransmisores. Presumiblemente, el flujo de calcio hacia el interior de las células gliales desencadenaba alguna respuesta. Pero, ¿qué tipo de respuesta? Con mayor radi-

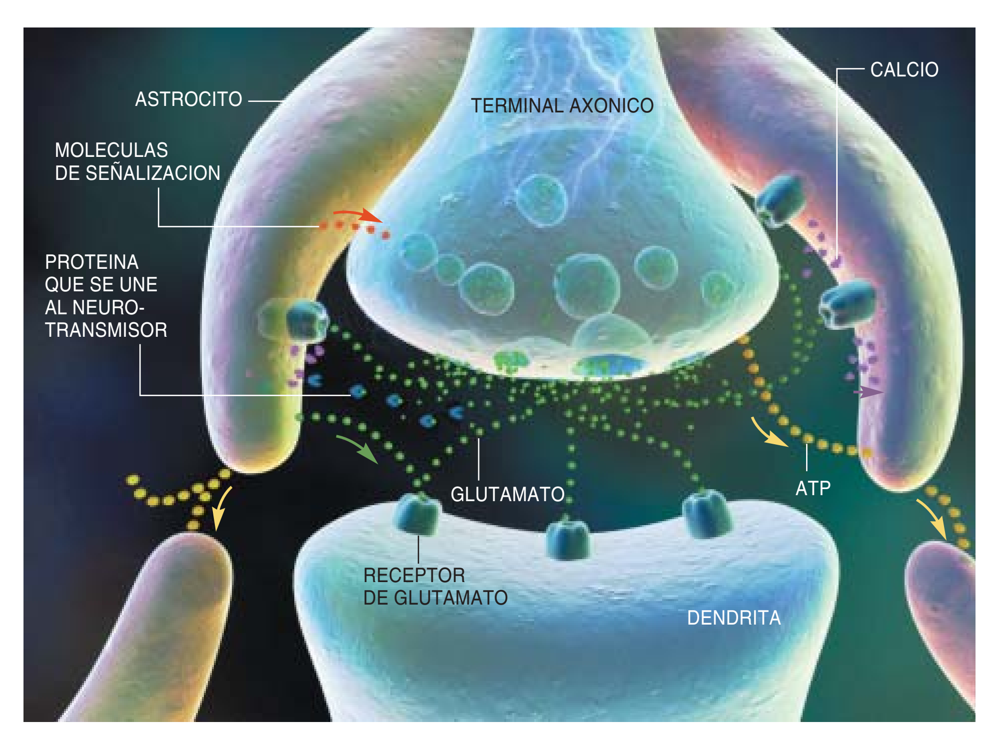


calidad, ¿qué es lo que incentivaba esa entrada de calcio?

Los elementos de la explicación se recogieron de trabajos realizados con anterioridad en torno a otras células gliales del cerebro: los astrocitos. Entre sus funciones, les cumple a éstos transportar nutrientes desde los capilares hasta las células nerviosas. Deben también mantener, alrededor de las neuronas, las condiciones iónicas óptimas para la transmisión de señales eléctricas. Ello lo consiguen eliminando el exceso de iones y neurotransmisores que las neuronas liberan en su proceso de excitación. En un estudio clásico llevado a cabo en 1990, el grupo dirigido por Stephen J. Smith utilizó la técnica de formación de imágenes del calcio para demostrar que la concentración de este ion en un astrocito aumentaba repentinamente cuando se añadía glutamato (un neurotransmisor) al cultivo celular. Enseguida se propagaron ondas de calcio por todos los astrocitos del cultivo. Los astrocitos reaccionaron como si el neurotransmisor hubiera sido liberado por una neurona.

Algunos expertos se plantearon si tal comunicación se debía al tránsito de iones calcio u otras moléculas señalizadoras afines por las puertas abiertas entre astrocitos colindantes. En 1996, S. Ben Kater y su equipo, de la Universidad de Utah, minaban esa posibilidad. Con un microelectrodo muy afilado, cortaron una línea recta a través de una capa de astrocitos en cultivo; crearon así un espacio vacío, libre de células, a manera de autopista flanqueada por bosques en llamas. Cuando provocaron ondas de calcio a un lado del corte, éstas no tuvieron dificultad en cruzar el espacio vacío y propagarse hasta los astrocitos del otro lado. Por tanto, los astrocitos no se comunicaban por contacto físico, sino a través del medio extracelular.

Durante los años siguientes, otras investigaciones alcanzaron resultados similares. Las respuestas mediadas por calcio podían inducirse en los astrocitos agregando neurotransmisores o recurriendo a electrodos para estimular la liberación de neurotransmisores desde las sinapsis. Mientras tanto, fisiólogos y bioquímicos descubrían que la glía tenía receptores para muchos de los neurotransmisores que las neuronas emplean en su comunicación sináptica; contaba también con la mayoría de los canales iónicos que capacitan a las neuronas para disparar los potenciales de acción.



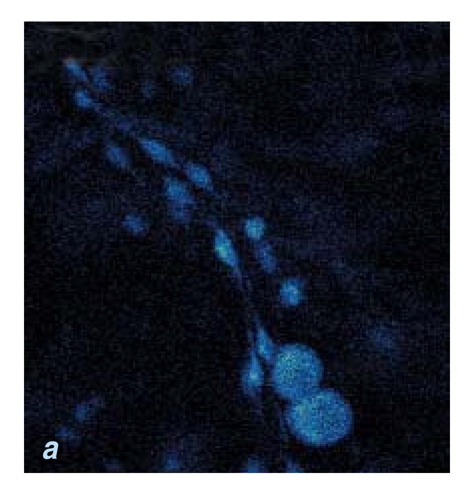
3. LOS ASTROCITOS REGULAN LA SEÑALIZACION sináptica. Lo hacen de varias formas. El axón transmite una señal a una dendrita mediante descarga de un neurotransmisor (*verde*); en este caso, el glutamato. Emite también ATP (*amarillo*). Estos compuestos provocan luego una entrada de calcio (*púrpura*) en los astrocitos; en virtud de la misma, los astrocitos establecen comunicación entre sí mediante la liberación de su propio ATP. Los astrocitos pueden reforzar la señalización secretando el mismo neurotransmisor; o bien pueden debilitarla, mediante absorción del neurotransmisor o secreción de proteínas que se enlacen con el mismo (*azul*), impidiendo así que alcance su diana. Los astrocitos liberan también moléculas de señalización (*rojo*) que provocan que el axón incremente o reduzca la cantidad de neurotransmisor liberado cuando vuelva a activarse. El cerebro utiliza la modificación de las conexiones entre neuronas para revisar sus respuestas ante estímulos a medida que va acumulando experiencia, es decir, conforme aprende. En el sistema nervioso periférico, son las células de Schwann las que rodean las sinapsis.

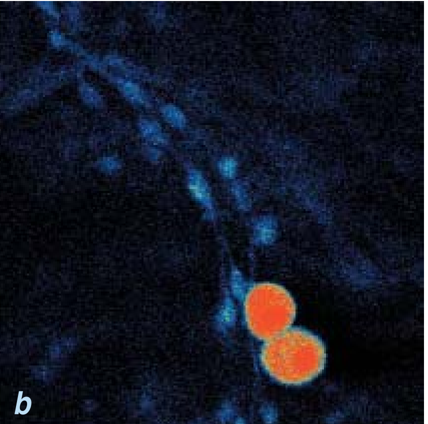
JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*

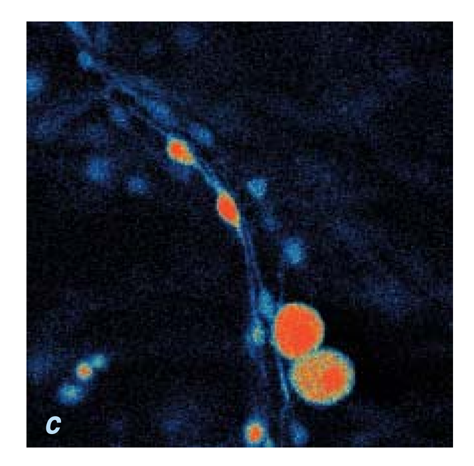
ATP: mensajero glial

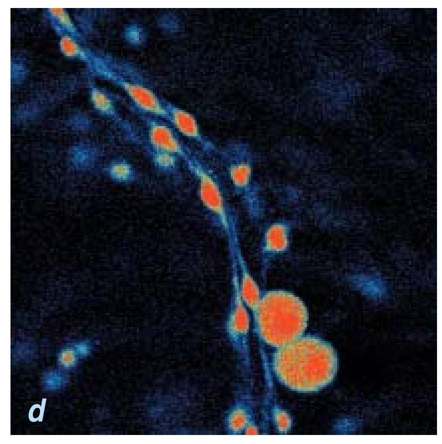
Estos y otros hallazgos causaban desconcierto y confusión. Por un lado, la comunicación entre células gliales se controlaba mediante absorción de calcio, igual que en la comunicación neuronal; mas, por otro lado, los pulsos eléctricos inducían cambios de concentración de calcio en las neuronas, pulsos que ni existían en la glía ni alcanzaban a ésta. Entonces, ¿qué mecanismo iniciaba la entrada de calcio en la glía? ¿Se trataba de un fenómeno eléctrico diferente o de otro mecanismo?

En sus experimentos con la glía, los investigadores observaron la acumulación de una molécula que les resultaba muy familiar: el ATP (trifosfato de adenosina), la principal fuente de la energía requerida para el desarrollo de la actividad celular. Además de reservorio energético, el ATP constituye un excelente mensajero intercelular. Dado que se concentra principalmente en el









4. SECUENCIA DE FOTOGRAMAS elaborada mediante microscopía confocal de barrido con láser (*coloreada digitalmente*). Nos revela que las células gliales responden al intercambio de mensajes entre neuronas. (*a*) Se mezclaron neuronas sensitivas (*dos somas neuronales grandes*, de 20 micras de diámetro) y células gliales de Schwann (*cuerpos pequeños*) en un cultivo que contenía iones de calcio (*no visible*). Se introdujo en las células un colorante que emite fluorescencia cuando se le unen iones calcio. (*b*) Un pequeño voltaje aplicado a las neuronas bastó para que éstas emitieran potenciales de acción a lo largo del axón (*ejes largos*) y destellaran de inmediato, una prueba de que habían abierto los canales de calcio de sus membranas para permitir que éste penetrase en su interior. (*c*) Doce segundos más tarde, conforme las neuronas continuaban activas, empezaron también a encenderse las células de Schwann, manifestación de que habían empezado a absorber calcio en respuesta a las señales que cursaban por los axones. (*d*) Transcurridos dieciocho segundos, refulgían más células gliales, pues habían percibido las señales. La secuencia muestra que la glía registra los mensajes neuronales a lo largo de los axones y no sólo en las sinapsis, donde encontramos los neurotransmisores.

CORTESIA DE R. DOUGLAS FIELDS; FUENTE: PROCEDENTE DE MATERIAL SUPLEMENTARIO DE B. STEVENS Y R. D. FIELDS EN *SCIENCE*, VOL. 287, PAGS. 2267–2271; 24 DE MARZO, 2000. USO AUTORIZADO

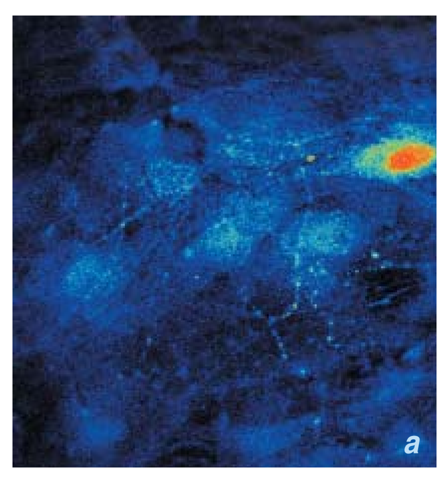
interior de las células y que, al tratarse de una molécula pequeña, se difunde y degrada rápidamente, los nuevos mensajes que porta el ATP no se confunden con los viejos. Añádase que el ATP se encuentra limpiamente empaquetado dentro de los extremos axónicos, donde también se almacenan los neurotransmisores. Por tanto, se libera junto con los neurotransmisores en las sinapsis y accede así al medio extracelular.

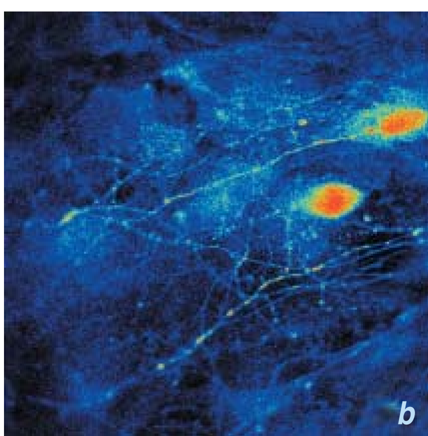
En 1999, Peter B. Guthrie y su grupo, de la Universidad de Utah, demostraron de forma concluyente que, cuando son excitados, los astrocitos liberan ATP a su alrededor. El ATP se une entonces a receptores de los astrocitos vecinos y promueve así la apertura de los canales iónicos, que permiten una entrada masiva de calcio. La subida de calcio provoca en esas células la liberación de ATP y el ciclo vuelve a empezar. Tenemos, pues, una reacción en cadena de respuestas al calcio iniciada y mediada por ATP, que se propaga a través de la población de astrocitos.

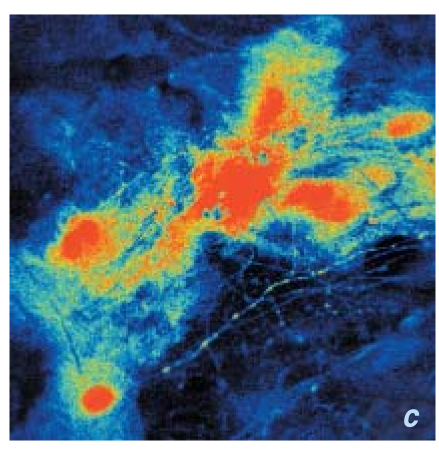
De acuerdo con estos resultados, se presentó un modelo sobre la percepción de la actividad neuronal por la glía que rodea al axón, para luego comunicárselo a la glía residente en la sinapsis axónica. La excitación de la neurona promueve que las células gliales en torno al axón emitan ATP; ello provoca la absorción de calcio en la glía circundante, induciendo ulterior liberación de ATP. De esta forma, la comunicación a lo largo de un cordón de células gliales se propaga y se aleja de la neurona que inició el proceso. Pero, ¿cómo detectaba la glía de nuestro experimento la excitación neuronal, si los axones no establecían contacto sináptico con la glía y la glía en torno al axón no se hallaba en la vecindad de la sinapsis? La respuesta no podía encontrarse en los neurotransmisores, puesto que éstos no se difunden fuera de los axones (si así fuera, actuarían en sitios no deseados, provocando estragos en el cerebro). Tal vez el mensaje era transmitido por ATP, que, además de liberarse junto con neurotransmisores durante la excitación axónica, se escapaban lo largo del axón.

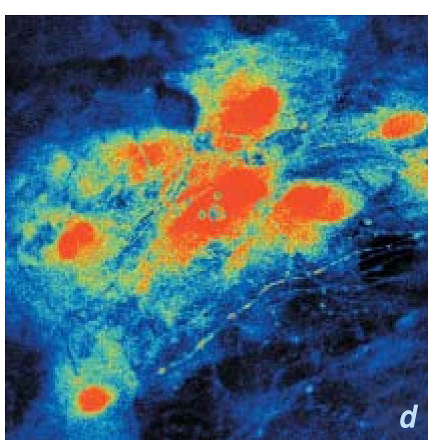
Para someter esta hipótesis a prueba, estimulamos eléctricamente cultivos puros de axones de células ganglionares de la raíz dorsal. Sirviéndonos de la misma enzima que, mediada por ATP, explica el resplandor de las luciérnagas, comprobamos que los axones liberaban ATP, puesto que el medio se iluminaba cuando éstos se excitaban. Añadimos luego células de Schwann al cultivo y medimos la respuesta en calcio. Observamos que éstas se encendían en cuanto los axones transmitían un potencial de acción. Sin embargo, cuando agregamos la enzima apirasa, que destruye el ATP —y por tanto lo intercepta antes de que alcance cualquier célula de Schwann—, la glía permaneció apagada cuando los axones se activaban. Se había bloqueado la respuesta de calcio en las células de Schwann por la sencilla razón de que nunca llegaron a recibir el mensaje del ATP.

En efecto, el ATP liberado desde un axón disparaba la entrada de cal-









5. COMUNICACION GLIAL En un cultivo que contenía iones calcio se mezclaron astrocitos y neuronas sensoriales, no visibles aquí (*a*). Tras estimular una neurona para que transmitiese potenciales de acción a lo largo de largos axones (*relámpagos*), la glía empezó a iluminarse, indicio de que había captado el mensaje y comenzado a absorber calcio (*b*). Después de 10 y 12,5 segundos, aparecieron enormes ondas de calcio que barrían la zona, propagando señales entre muchos astrocitos (*c* y *d*). La gradación de verde, amarillo y rojo corresponde al aumento en la concentración de calcio.

cio en las células de Schwann. Mediante análisis bioquímico y microscopía digital, también observamos que el flujo de calcio causaba que ciertas señales viajasen desde la membrana celular hasta el núcleo, donde se almacena el material genético, provocando la expresión de varios genes. Se trataba de un hallazgo asombroso: mientras se comunicaba con otras neuronas, un axón podía ordenar la transcripción de genes en una célula glial y, con ello, influir en su comportamiento.

Control de la mielinización

Llegados a este punto, todos los trabajos nos conducían a la conclusión siguiente: una célula glial percibe los potenciales de acción de las neuronas al detectar el ATP que se escapa por un axón activo o bien el que se libera en una sinapsis. La célula glial transmite su mensaje interno vía iones de calcio. Estos, a su vez, activan enzimas que liberan ATP a otras células gliales o activan enzimas que controlan la expresión de genes.

Cabía entonces inquirir qué funciones controlaban esos genes. ¿Tendría alguna relación de influencia sobre las neuronas adyacentes? Stevens se dispuso a resolver la cuestión centrándose en el proceso que promueve la producción del revestimiento mielínico de los axones. Dicha capa aislante resulta clave para la conducción de impulsos nerviosos a alta velocidad y largas distancias. Su crecimiento permite a un bebé mantener gradualmente la cabeza erguida; su destrucción por esclerosis múltiple y patologías similares causa graves discapacidades.

Nos concentramos en la mielina porque queríamos averiguar en virtud de qué una célula de Schwann inmadura que se encuentra sobre un axón del sistema nervioso periférico de un feto o de un bebé sabe qué axones precisarán mielina y cuándo comenzar a recubrir tales axones, o si debería, por el contrario, transformarse en una célula no mielinizante. (En general, sólo los axones de gran diámetro necesitan mielina.) ¿Podrían los impulsos axónicos o la liberación de ATP incidir en tales decisiones? Observamos que las células de Schwann en cultivo proliferaban con mayor lentitud cuando se concentraban en torno a axones excitados que cuando rodeaban a axones en reposo. Había más: en presencia del potencial de acción, el desarrollo de las células de Schwann se detenía y la formación de mielina se bloqueaba. La adición de ATP producía los mismos efectos.

Sin embargo, trabajando con Vittorio Gallo y su grupo, descubrí un comportamiento completamente opuesto en la oligodendroglía que forma la vaina de mielina en el cerebro. En este caso, el ATP no inhibía la proliferación de los oligodendrocitos; antes bien, la adenosina —molécula resultante de la degradación del ATP, que ha perdido sus grupos fosfato— estimulaba la maduración de las células y su producción de mielina. Ambos hallazgos indican que la existencia de varios tipos de receptores en las células gliales permite que la neurona envíe por separado mensajes a la glía del sistema nervioso central distintos y a la glía del sistema periférico, sin necesidad de sintetizar moléculas mensajeras distintas ni de especificar el destinatario del mensaje.

Importa avanzar en el conocimiento del proceso de mielinización. Cada año mueren miles de personas y un número incontable más quedan paralíticas o ciegas debido a enfermedades desmielinizantes. La más insidiosa, la esclerosis múltiple, que afecta a una de cada 700 personas. Se ignora qué es exactamente lo que inicia la mie-

linización; sí sabemos que la adenosina, sustancia procedente del axón, estimula el proceso. El hecho de que esta molécula la liberen los axones en respuesta a su excitación, revela que la actividad cerebral influye en la mielinización. Tales hallazgos podrían marcar el camino para posibles tratamientos; pensemos, por ejemplo, en fármacos que remedaran la adenosina; asimismo, el suministro de adenosina a células madre podría determinar su transformación en glía mielinizante para su trasplante ulterior a nervios dañados.

Más allá de las neuronas

De acuerdo con el estado actual de la investigación, todo indica que el ATP y la adenosina median los mensajes que cursan a través de las redes de células gliales de Schwann y de oligodendrocitos; en los astrocitos, los mensajes de calcio vendrían inducidos exclusivamente por el ATP. Pero, ¿se halla la glía facultada para regular el funcionamiento de las neuronas por otra vía que no sea la mencionada síntesis de mielina?

Las pruebas abonan una respuesta afirmativa. Richard Robitaille, de la Universidad de Montreal, observó que el voltaje producido por las sinapsis en el músculo de rana se intensificaba o se debilitaba en función de los compuestos químicos que inyectaba en las células de Schwann que se encontraban en las sinapsis. Cuando Eric A. Newman, de la Universidad de Minnesota, tocaba la retina de una rata, las oleadas de calcio enviadas desde la glía cambiaban la tasa de activación de las neuronas de la visión. Estudiando cortes del hipocampo (región implicada en la memoria) de una rata, Maiken Nedergaard, del Instituto Médico de Nueva York, observó que las sinapsis aumentaban su actividad eléctrica cuando los astrocitos adyacentes estimulaban ondas de calcio. Se admite que tales cambios en la intensidad sináptica constituyen el medio fundamental por el cual el sistema nervioso modifica su respuesta a través de la experiencia; semejante plasticidad induce a pensar que la glía podría participar en la base celular del aprendizaje.

LA GLIA CONTROLA LAS SINAPSIS

Desde hace años se ha venido dando por cierto que la formación de las sinapsis sólo dependía de las neuronas participantes en las mismas. La investigación reciente lo desmiente: la glía influye en la cuantía y el lugar de producción de sinapsis.

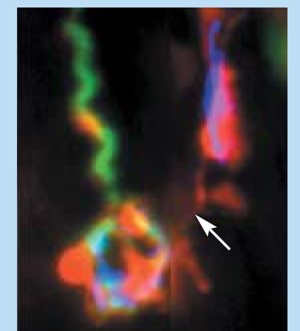
El grupo encabezado por Ben A. Barres, de la Universidad de Stanford, desarrolló cultivos de neuronas procedentes de una retina de rata, en ausencia de astrocitos (un tipo de células gliales). Y descubrieron que se establecían muy pocas sinapsis. Pero si añadían astrocitos, o medio de cultivo que había estado en contacto con astrocitos, se multiplicaban las sinapsis. Barres observó las sinapsis al microscopio y las contó; con un microelectrodo registró su actividad eléctrica (prueba de que estaban pasando señales a través de las sinapsis). Detectó entonces en el medio dos compuestos que los astrocitos liberan para fomentar la formación de sinapsis: el apoE/colesterol, un complejo lipídico, y la trombospondina, una proteína.

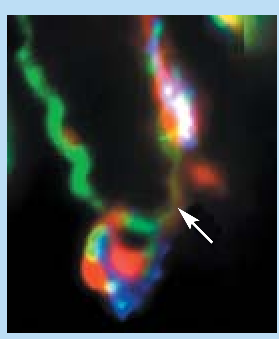
Mientras tanto, en el grupo de Jeff W. Lichtman, de la Universidad de Washington, filmaban sinapsis musculares en ratones durante varios días o semanas, a medida que se iban estableciendo o derogando en el transcurso del desarrollo (período en que se podan las sinapsis que no son necesarias) o a consecuencia de una lesión. Al abordar la secuencia fotograma a fotograma, se puso de manifiesto que ambos procesos sinápticos —formación y eliminación— estaban bajo la influencia de células distintas de las neuronas, que operaban en los terminales axónicos.

Más tarde, Le Tian, Wesley Thompson y sus colaboradores, de la Universidad de Texas en Austin, investigaron con un ratón transgénico, así manipulado para que sus células de Schwann gliales emitiesen fluorescencia. Este carácter permitió al equipo de Thompson colaborar con el grupo de Lichtman y observar a las células gliales que operaban en las uniones de las neuronas con los músculos; proeza hasta entonces inimaginable. Cuando el axón de un músculo sufre una lesión o una amputación, se retrae; pero un grupo de receptores de neurotransmisores se mantiene en el lado de la sinapsis que recibía el impulso, o sea en la célula receptora. Los investigadores sabían que un axón se regenera y encuentra su camino de vuelta hacia los receptores abandonados, siguiendo a las células de Schwann que persisten.

Pero, ¿qué sucedía si el axón no encontraba su camino? Siguiendo la fluorescencia, el grupo de Thompson observó que las células de Schwann en las sinapsis intactas percibían que una sinapsis vecina se hallaba en dificultad. Misteriosamente, de las células de Schwann brotaban ramificaciones que se extendían hasta la sinapsis dañada, tendiendo un puente que permitía al axón generar una nueva proyección hasta los receptores (*imágenes*).

El trabajo mostraba con nitidez que la glía ayudaba a determinar el lugar donde debían establecerse las sinapsis. Los investigadores buscan ahora sacarle partido a esa capacidad para el tratamiento de lesiones de la médula espinal mediante el trasplante de células de Schwann a regiones dañadas de la médula espinal de animales de laboratorio.





LA GLIA GUIA la formación de sinapsis. Le Tian seccionó una sinapsis neuromuscular en un ratón cuyas células habían sido manipuladas genéticamente para emitir fluorescencia. Dos días más tarde (*arriba*) las células de Schwann gliales (*rojo oscuro*) habían tendido un puente para salvar el hiato (*flecha*). Transcurridos dos días (*abajo*), un axón (*verde*) había vuelto a crecer a lo largo del puente para establecer una sinapsis.

LE TIAN Y WESLEY THOMPSON

Del conjunto de esas observaciones brota la cuestión que pasamos a exponer. La ola de calcio se dispersa por toda la población de astrocitos. Esta respuesta de macroescala resulta eficaz para gobernar al grupo entero, no para transmitir un mensaje harto complejo. Si las células de la glía intervienen en el procesamiento de la información, tiene que haber intercambios locales de señales.

En 1990, Smith y su grupo sostenía que las neuronas y la glía protagonizaban intercambios circunscritos de mensajes. Pero los

investigadores carecían de métodos experimentales refinados para simular el comportamiento real de un astrocito en una sinapsis. En 2003, Philip G. Haydon, de la Universidad de Pennsylvania, lo consiguió. Empleó una técnica láser para liberar una cantidad de glutamato en un corte de hipocampo del cerebro tan nimia, que pudiera detectarla sólo un astrocito. Bajo estas condiciones experimentales, Haydon observó que un astrocito enviaba señales específicas de calcio a un grupúsculo de astrocitos vecinos. En su opinión, además de las ondas de calcio, de alcance global para los astrocitos, existe también una conectividad de corto alcance entre astrocitos.

En otras palabras, los astrocitos se organizan en circuitos cerebrales restringidos que se coordinan con los circuitos neuronales. (Se desconocen los factores físicos o bioquímicos que definen estos circuitos astrocíticos discretos.) Otras investigaciones indicaron que los astrocitos podrían reforzar la señalización en las sinapsis mediante la secreción del mismo neurotransmisor que libera el axón; vale decir, amplificando la señal.

Estos descubrimientos sugieren la hipótesis siguiente: la comunicación entre astrocitos ayuda a activar neuronas cuyos axones terminan bastante lejos; esta actividad, a su vez, contribuye a la liberación de neurotransmisores en sinapsis remotas. A través de esa actividad se regularía la capacidad de las sinapsis remotas para acometer cambios de intensidad, que, sabido es, constituye el mecanismo celular subyacente bajo los procesos de aprendizaje y memoria.

En la reunión anual de la Sociedad de Neurociencia celebrada en noviembre de 2003 se aportaron resultados que respaldan nuestra hipótesis; podrían incluso extender el papel de la glía para que comprendiera su participación en la formación de nuevas sinapsis. Algunos de los informes se sustentaban en la investigación realizada dos años antes por Ben A. Barres, Frank W. Pfrieger y sus colegas de Stanford; a tenor de la misma, las neuronas de rata que crecían en cultivo formaban más sinapsis en presencia de astrocitos.

Karen S. Christopherson y Eric M. Ullian, estudiantes de posgrado en el laboratorio de Barres, descubrieron más tarde que la trombospondina, proteína sintetizada presumiblemente por el astrocito, era el mensajero químico que estimulaba la formación de la sinapsis. De la trombospondina se conocían diversas funciones biológicas, pero no se le atribuía ningún papel relevante en el sistema nervioso. Sin embargo, cuanta más trombospondina añadían al cultivo de astrocitos, más sinapsis aparecían. A la trombospondina podría corresponder la labor de congregar proteínas y otros compuestos necesarios para formar una sinapsis durante el proceso de desarrollo de redes nerviosas incipientes; en ese contexto, podrían contribuir a la modificación de las sinapsis conforme envejecen dichas redes.

Nuevos ensayos habrán de permitir un conocimiento más profundo del cuadro que empieza a configurarse en torno al papel de las células de la glía en el cerebro. Habrá que comprobar hasta qué punto los astrocitos sinápticos condicionan la memoria, o la potenciación a largo plazo por referirnos a su equivalente celular. También, determinar con exactitud en qué medida las señales enviadas a través de circuitos de astrocitos repercuten en sinapsis remotas.

No debiera sorprendernos que los astrocitos influyan en la formación de sinapsis lejanas. Para crear vínculos entre estímulos procesados por diferentes circuitos de neuronas —el olor de cierto perfume y los sentimientos que despierta hacia la persona que lo usa—, el cerebro debe establecer una rápida comunicación entre circuitos neuronales que no se encuentran directamente conectados. Si las neuronas operan como teléfonos fijos que se comunican eléctricamente a través de conexiones sinápticas a modo de cables, los astrocitos pueden asimilarse a teléfonos celulares, que se comunican mediante señales químicas que se extienden por zonas amplias, pero que sólo son detectadas por astrocitos que tengan sintonizados los receptores apropiados para recibir el mensaje. Si las señales cursan a través de las redes de astrocitos, entonces dos poblaciones de glía distantes podrían entrar en conexión y coordinar la activación de redes neuronales de distintas regiones del cerebro.

Nos revela la anatomía cerebral comparada que la razón de glía a neuronas aumenta de un modo significativo conforme ascendemos en la escala evolutiva. Haydon se pregunta si una conectividad generalizada entre astrocitos favorecería la capacidad de aprendizaje. Se han puesto manos a la obra para comprobarlo en nuevos experimentos. Tal vez una mayor concentración de glía o un tipo más potente de glía sea lo que eleva a ciertos humanos a la categoría de genios. Einstein nos enseñó el valor de atreverse a pensar más allá de lo establecido. Siguiendo su ejemplo, los neurólogos se han lanzado a mirar más allá de las neuronas para ver si la glía participa en el procesamiento de la información.

El autor

R. Douglas Fields, profesor de la Universidad de Maryland, dirige el área de desarrollo y plasticidad del sistema nervioso en el Instituto Nacional de Salud Pediátrica.

Bibliografía complementaria

DRIVING MR. ALBERT: A TRIP ACROSS AMERICA WITH EINSTEIN'S BRAIN. Michael Paterniti. Delta, 2001.

NEW INSIGHTS INTO NEURON-GLIA COMMUNICATION. R. D. Fields y B. Stevens-Graham en *Science*, vol. 298, págs. 556-562; 18 de octubre, 2002.

ADENOSINE: A NEURON-GLIAL TRANSMITTER PROMOTING MYELINATION IN THE CNS IN RESPONSE TO ACTION POTENTIALS. B. Stevens, S. Porta, L. L. Haak, V. Gallo y R. D. Fields en *Neuron*, volumen 36, n.º 5, págs. 855-868; 5 de diciembre, 2002.

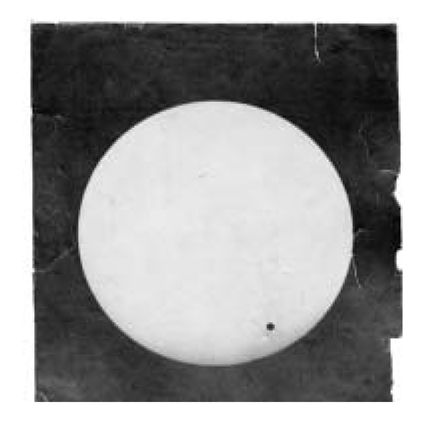
ASTROCYTIC CONNECTIVITY IN THE HIPPOCAMPUS. Jai-Yoon Sul, George Orosz, Richard S. Givens y Philip G. Haydon en *Neuron Glia Biology*, vol. 1, págs. 3-11; 2004.

El tránsito de Venus

Este mes de junio, cuando Venus cruce ante el disco solar, recordaremos uno de los grandes capítulos de la historia de la astronomía

Steven J. Dick

"Encontrámonos ahora en vísperas del segundo de los tránsitos de un par, tras el cual no habrá ninguno hasta que el siglo XXI de nuestra era haya amanecido sobre la Tierra y nazcan las flores de junio de 2004... Cuál será el estado de la ciencia cuando llegue esa siguiente estación de tránsitos, sólo Dios puede saberlo."



1. LA MOTA NEGRA que vemos delante del Sol es Venus, fotografiado en su último tránsito, en 1882.

William Harkness,
Observatorio Naval de EE.UU., 1882

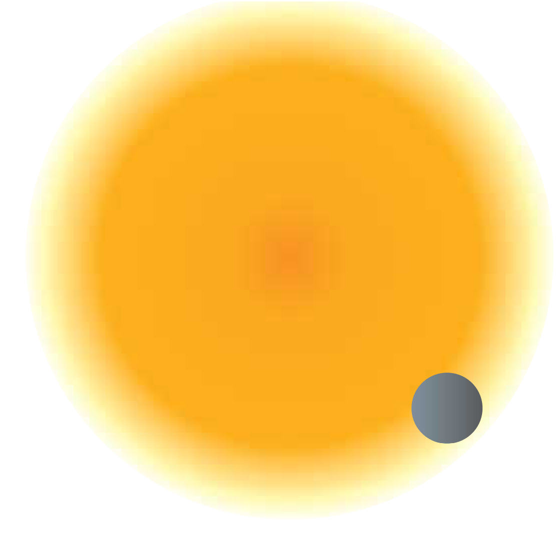
El amanecer del 8 de junio de 2004 será, en apariencia, como el de cualquier otro día. Empero, muchos afortunados podrán presenciar en distintas partes del mundo un raro acontecimiento astronómico. Los observadores que se encuentren en lugar propicio, provistos de binoculares o telescopios y de filtros que les protejan los ojos, contemplarán el planeta Venus recortado sobre el Sol: una mota negra que irá atravesando el disco fulgente a lo largo de casi seis horas. El tránsito de Venus será visible de principio a fin en casi toda Asia, en Africa y en Europa. En Australia sólo se verán los primeros estadios, justo antes de que el Sol se ponga allí. Venus habrá recorrido ya tres cuartas partes de su travesía solar cuando amanezca en las costas orientales de América. Los moradores de las occidentales no tendrán fortuna; se perderán el acontecimiento (*véase la figura 3*).

Los tránsitos de Venus no son, ni de lejos, tan espectaculares como los eclipses de Sol, resultado de la interposición de la Luna entre la Tierra y el Sol. Aunque el diámetro de Venus sea tres veces y media mayor que el de la Luna, se halla a tal distancia de la Tierra, que sólo parecerá una mancha en el disco solar; su diámetro medirá un 3 % del diámetro solar. ¿A qué, pues, el gran interés que demuestran científicos, educadores y astrónomos aficionados ante el ya inmediato tránsito? Buena parte del atractivo del fenómeno reside en su rareza misma: los astrónomos sólo han observado cinco tránsitos de Venus; el último, el 6 de diciembre de 1882. Los vigías del cielo que se pierdan el tránsito de 2004 dispondrán de una segunda oportunidad en 2012; después tendrán que pasarle el relevo a sus descendientes del año 2117.

El tránsito llama también la atención por la pintoresca historia de su observación en los siglos XVII, XVIII y XIX. Cuenta con todos los ingredientes de una novela: rivalidades internacionales, misteriosos efectos en las observaciones, resultados controvertidos que afectaban a uno de los problemas más arduos de la historia de la astronomía. Por otra parte, conserva gran interés para los investigadores contemporáneos: pudiera arrojar luz sobre uno de los problemas más candentes de la astronomía moderna, a saber, la detección de planetas en otros sistemas solares.

De Kepler al Capitán Cook

Que suceda un tránsito planetario cualquiera es pura cuestión de geometría: el planeta ha de interponerse entre el observador y el Sol. Desde la Tierra se pueden observar tránsitos de Mercurio y de Venus. Desde Marte se podrían observar también tránsitos de la Tierra. (El famoso cuento de Arthur C. Clarke "Tránsito de Tierra" se inspira en que, desde Marte, se habría visto la Tierra atravesar la faz del Sol el 11 de mayo de 1984.) La rareza de tales acontecimientos se debe a que las órbitas de los planetas no se encuentran en el mismo plano que la eclíptica, la trayectoria que el Sol, visto desde la Tierra, describe a través de la bóveda celeste. La órbita de Venus está inclinada 3,4 grados con respecto a la de la Tierra, por lo que incluso cuando se encuentra (visto desde la Tierra) en la misma di-



rección que el Sol ("en conjunción", dicen los astrónomos), la mayor parte de las veces estará demasiado por encima o por debajo de la eclíptica para que se le vea atravesando el disco del Sol (*véase el recuadro* "Aspectos geométricos de un tránsito"). Tampoco la Luna, por un motivo similar, causa un eclipse de Sol una vez cada mes en su orbitar alrededor de la Tierra: normalmente pasa por encima o por debajo de la eclíptica.

El tránsito de Venus tiene lugar sólo cuando la Tierra y Venus se hallan en conjunción cerca de los puntos de intersección de sus respectivos planos orbitales. Por este motivo, los tránsitos se repiten sólo cuatro veces cada 243 años. Los intervalos entre tránsitos obedecen a una regla predictible: a un tránsito sigue otro ocho años más tarde; el siguiente tiene lugar pasados 105,5 años, y un cuarto, a los ocho años de éste; el ciclo recomienza transcurridos 121,5 años. ¿A qué se debe que los tránsitos suelan producirse a pares separados ocho años? Dado que Venus invierte 224,7 días en viajar alrededor del Sol, resulta que 13 años venusianos son casi exactamente iguales a 8 terrestres. Ocho años después del primero de los tránsitos de un par, la Tierra y Venus retornan a una situación muy próxima de la primera, por lo que volverán a quedar más o menos alineados con el Sol. El diámetro aparente del Sol —el tamaño con que lo vemos en el cielo— es de alrededor de medio grado, lo que consiente algo de holgura. Si el primer tránsito tuvo lugar cerca de un borde del limbo solar, el siguiente estará próximo a la porción del borde diametralmente opuesta. En ocasiones, sin embargo, sólo se produce un tránsito porque uno de los dos emparejados cae "fuera" por poco. Hubo sólo un tránsito de Venus en el siglo XIV y eso mismo volverá a suceder el 18 de diciembre de 3089.

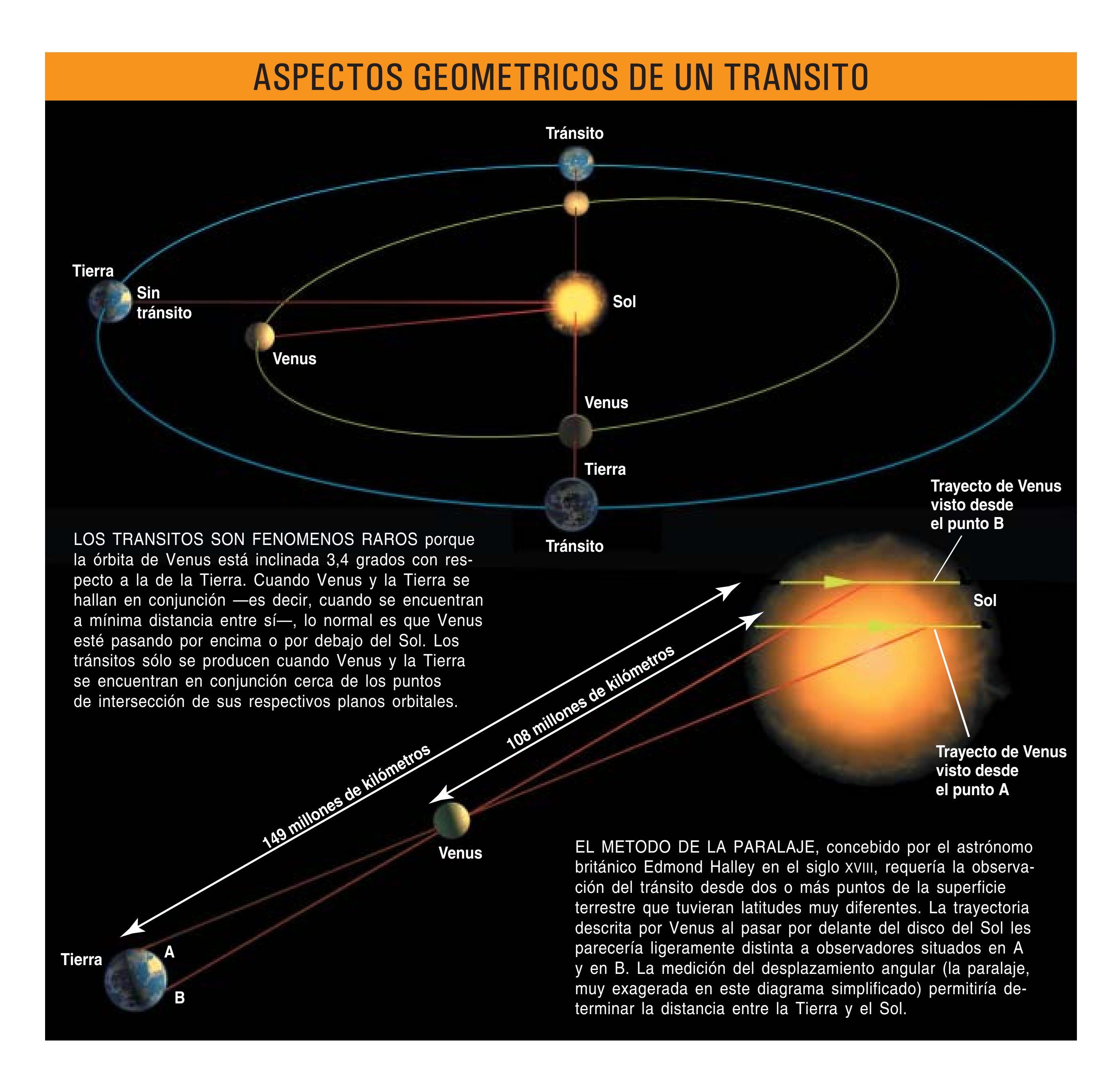
Debido a que los tránsitos de Venus son difíciles de observar a simple vista, pasaron desapercibidos durante casi toda la historia. El primero en pronosticar un tránsito planetario fue Johannes Kepler, cuyas Tablas Rudolfinas proporcionaban, en su tiempo, la más rigurosa guía de los movimientos planetarios. Kepler determinó que Mercurio habría de cruzar por delante del Sol el 7 de noviembre de 1631, seguido por Venus, que lo haría el 6 de diciembre del mismo año. Kepler no vivió lo suficiente para ver cumplidas sus predicciones: murió en 1630. Pero el tránsito de Mercurio fue observado por tres personas cuando menos, entre ellas, muy señaladamente, el eminente sabio Pierre Gassendi. Dejó una descripción detallada. Estimó que el diámetro aparente de Mercurio era de unos 20 segundos de arco —es decir, alrededor de 1/180 de grado—, medición que constituía por sí misma una muy notable hazaña científica. El tránsito de Venus, en cambio, no era visible desde Europa, y aunque Kepler había hecho correr la voz por todo el mundo, no se sabe de nadie que lo observase.

El astrónomo Jeremiah Horrocks (1618-1641) calculó que se produciría otro tránsito de Venus el 4 de diciembre de 1639. (La fecha citada por Horrocks fue el 24 de noviembre, porque Gran Bretaña no adoptó el calendario gregoriano hasta 1752.) Instaló un pequeño telescopio en su casa de Much Hoole, cerca de Liverpool, y, mediante la proyección de la luz del telescopio sobre una hoja de papel, obtuvo una imagen ampliada del Sol. Llegado el mediodía no había observado aún nada fuera de lo común; de mala gana tuvo que salir, probablemente para celebrar un oficio religioso. Cuando regresó, poco después de las tres de la tarde, encontró a Venus ya entrado en el disco solar. Horrocks sólo pudo observar las fases iniciales del tránsito en los treinta minutos que faltaban para que el Sol se pusiera; aun así, pudo estimar que el diámetro aparente de Venus rondaría en torno al minuto de arco, unas tres veces más que el diámetro que Gassendi le había visto a Mercurio. Un amigo de Horrocks, William Crabtree, se valió de un telescopio parecido en Manchester, unos 40 kilómetros al sureste de Much Hoole, y pudo atisbar el tránsito de Venus justo antes de la puesta de sol. Horrocks y Crabtree fueron, que se sepa, los dos únicos seres humanos que presenciaron la efeméride.

Los tránsitos de 1761 y de 1769 conocieron observaciones mucho más serias. Por aquella época, el astrónomo real británico, Edmond Halley, el del famoso cometa, había expuesto detalladamente un método para determinar la distancia entre la Tierra y el Sol (distancia hoy conocida como "unidad astronómica") que se fundaba en el tránsito de Venus. Desde dos o más puntos de la Tierra con latitudes muy distintas, se vería describir a Venus una senda ligeramente diferente a través del disco del Sol. Dado que cada trayectoria es la cuerda de un arco de círculo —una línea recta que conecta dos puntos del borde del disco solar—, resultaría posible medir el desplazamiento an-

Resumen/Un tránsito prodigioso

- Los tránsitos de Venus acontecen cuando el planeta pasa directamente por delante del Sol (al ser observado desde la Tierra). De ordinario, sólo se producen cuatro tránsitos cada 243 años.
- Como el tránsito de Venus es difícilmente apreciable a simple vista, no ha sido observado más que cinco veces hasta ahora. El tránsito sirvió en los siglos XVIII y XIX para determinar la distancia entre la Tierra y el Sol.
- El tránsito de este año ha despertado la máxima expectación entre los astrónomos, tanto profesionales como aficionados. Las observaciones podrían resultar útiles en la preparación de un satélite espacial destinado a la detección de planetas en otros sistemas solares.



LOS TRANSITOS SON FENOMENOS RAROS porque la órbita de Venus está inclinada 3,4 grados con respecto a la de la Tierra. Cuando Venus y la Tierra se hallan en conjunción —es decir, cuando se encuentran a mínima distancia entre sí—, lo normal es que Venus esté pasando por encima o por debajo del Sol. Los tránsitos sólo se producen cuando Venus y la Tierra se encuentran en conjunción cerca de los puntos de intersección de sus respectivos planos orbitales.

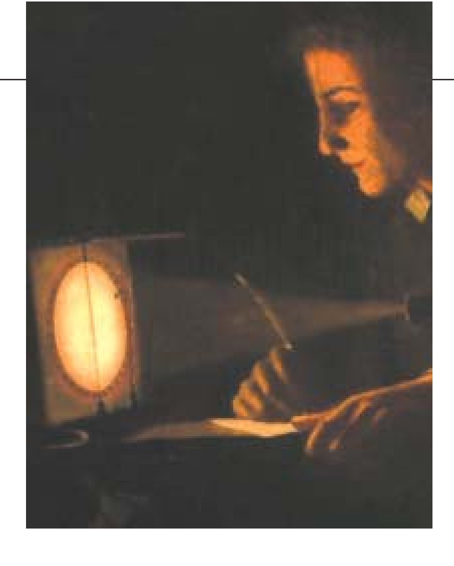
EL METODO DE LA PARALAJE, concebido por el astrónomo británico Edmond Halley en el siglo XVIII, requería la observación del tránsito desde dos o más puntos de la superficie terrestre que tuvieran latitudes muy diferentes. La trayectoria descrita por Venus al pasar por delante del disco del Sol les parecería ligeramente distinta a observadores situados en A y en B. La medición del desplazamiento angular (la paralaje, muy exagerada en este diagrama simplificado) permitiría determinar la distancia entre la Tierra y el Sol.

ALFRED T. KAMAJIAN

gular entre las cuerdas por comparación de la duración de los tránsitos. Esta desviación angular, o paralaje, mediría la distancia entre la Tierra y Venus, ya que una y otra cantidades son inversamente proporcionales. Para comprender este método, alcemos un dedo a unos palmos de la nariz y mirémoslo guiñando primero un ojo y luego el otro. El desplazamiento aparente al guiñar cada ojo será mayor cuanto más cerca esté el dedo de la nariz.

Aunque Mercurio efectúa 13 o 14 tránsitos en cada siglo, no resultaba un candidato aceptable ni para el método de la paralaje de Halley, ni para las variantes ideadas por otros astrónomos. A causa de la gran distancia entre Mercurio y la Tierra, los desplazamientos angulares eran demasiado pequeños para que se pudiese realizar una medición precisa. Incluso en el caso de Venus, mucho más cercano, las observaciones eran delicadas; se tenían que conocer las posiciones geográficas exactas de las estaciones observadoras y cronometrar con precisión los cuatro “contactos” entre Venus y el Sol (los contactos primero y segundo se producen en el ingreso, cuando el disco de Venus toca al disco solar, desde el exterior primero y luego por el interior; los contactos tercero y cuarto tienen lugar en la salida). Pero las observaciones aportarían beneficios enormes. Eran conocidas ya, por las leyes de Kepler del movimiento planetario, las distancias relativas de todos los planetas al Sol, así que la determinación de la paralaje de Venus permitiría conocer la paralaje solar. Y tal medida, a su vez, permitiría calcular no sólo la distancia que separa la Tierra del Sol, sino también la escala de todo el sistema solar.

Desafortunadamente, los frutos del tránsito de 1761 no fueron tan buenos como se esperaba: los valores medidos para la paralaje solar oscilaron entre 8,3 y 10,6 segundos de



arco. Pero las observaciones de 1769 proporcionaron un intervalo más estrecho —de 8,43 a 8,8 segundos de arco—, que daba una unidad astronómica entre los 142,47 y los 156,1 millones de kilómetros. Entre los observadores de 1769 se encontraba David Rittenhouse, el más destacado científico de las colonias norteamericanas. Se desmayó de la emoción tras observar el tránsito por su telescopio. El primer viaje del explorador británico James Cook, capitán del *Endeavour*, se organizó no sólo para explorar el Pacífico Sur, sino también para la observación del tránsito. Cook y su tripulación escrutaron el fenómeno en una zona de Tahití conocida todavía hoy por Punta Venus, así como desde otros dos lugares cercanos. Pero Cook informó de un ominoso problema que también lastró a otros observadores: la determinación de los tiempos exactos del contacto de Venus con el Sol fracasó porque los limbos de uno y otro cuerpo parecían quedar adheridos durante varios segundos (*véase la figura* 2). Cook conjeturó que este efecto óptico, que se conocería como la "gota negra", estaba causado por una "...atmósfera o nube oscura que envolvía el cuerpo del planeta".

Cuando en 1824 el astrónomo alemán Johann Franz Encke analizó los resultados de los dos tránsitos del siglo XVIII, se decidió por un valor de 8,58 segundos de arco para el valor de la paralaje solar, lo que correspondía a una distancia media de 148,43 millones de kilómetros. Pero 30 años más tarde, el danés Peter Andreas Hansen arguyó, basándose en perturbaciones del movimiento de la Luna provocadas por la gravitación del Sol, que éste se hallaba más cerca. Avalaron esta afirmación las mediciones de la paralaje de Marte de 1862, obtenidas por comparación de las posiciones que ocupaba en el firmamento cuando se lo observaba desde puntos muy distantes; daban a la unidad astronómica valores comprendidos entre 146,42 y 148,8 millones de kilómetros. Así pues, en vísperas de los tránsitos de Venus en el siglo XIX, era todavía grande la incertidumbre acerca del valor de la distancia de la Tierra al Sol. El astrónomo real británico George B. Airy dijo a mediados de ese siglo que la determinación de la paralaje solar constituía "el problema más noble de la astronomía". Agnes Clerke, historiadora de la astronomía del siglo XIX, escribió que la paralaje solar era "la vara de medir del universo... el dato fundamental de la astronomía: su unidad de espacio. Cualquier error en su estimación se repite y multiplica en mil diferentes formas, tanto en los sistemas planetarios como en los sidéreos".

Tras la paralaje

Para 1857 Airy había formulado un plan general de observación del tránsito de Venus de 1874; Gran Bretaña estaba construyendo ya los instrumentos necesarios hacia 1870. Había proyectos similares en marcha en otras partes del mundo científico. Al aproximarse el tan esperado acontecimiento, partieron 26 expediciones desde Rusia, 12 desde Gran Bretaña, ocho desde Estados Unidos, seis desde Francia, otros tantas desde Alemania, tres desde Italia y una desde Holanda. "Todo país que quería mantener o adquirir una reputación por su celo científico dio un paso al frente para cooperar en la grande y cosmopolita empresa del tránsito", escribió Clerke. La pintoresca historia de estas expediciones exigiría un libro; cada una vivió sus avatares y alcanzó diversos grados de éxito o fracaso.

Simon Newcomb, del Observatorio Naval de EE.UU. —la principal institución astronómica de Norteamérica en aquel tiempo—, apremió a la Academia Nacional de Ciencias para que se encargara de la tarea. El Congreso estadounidense constituyó una Comisión del Tránsito de Venus, en la que Newcomb y otros astrónomos del Observatorio Naval desempeñaron papeles prominentes. La Comisión pertrechó ocho expediciones para el acontecimiento de 1874, tres destinadas al hemisferio norte y cinco al sur. El Congreso aprobó en total la suma de 177.000 dólares, equivalentes a más de un par de millones de ahora.

Cada expedición contaba con una instrumentación completa y compleja. Para la observación visual de los instantes de contacto entre Venus y el Sol utilizaron telescopios refractores con un objetivo de 127 mm, construidos por Alvan Clark and Sons, el más importante constructor de telescopios de EE.UU. en el siglo XIX. Fotografiaron el Sol mediante un fotoheliógrafo, un instrumento inventado apenas veinte años antes. Un espejo, que giraba despacio de manera que mantenía estática la imagen del Sol, encaminaba la luz de éste a un telescopio horizontal fijo de 12 metros de distancia focal. El telescopio producía imágenes del disco solar de 10 cm de diámetro; así se seguía con gran precisión el desplazamiento de Venus a través del disco solar.

SCIENTIFIC AMERICAN, que prestó el mayor de los intereses a las expediciones, informaba el 26 de septiembre de 1874 de que el navío *Swatara*, que llevaba a las expediciones estadounidenses destinadas al hemisferio sur, había realizado la travesía de Nueva York a Brasil en 35 veloces días. Los europeos optaron, en su mayoría, por sistemas fotográficos de otro tipo: telescopios más pequeños y de menor distancia focal. Sus instrumentos estaban orientados a la obtención de fotografías de alta calidad, pero dado que tales imágenes serían más pequeñas que las de los equipos norteamericanos, medir la posición de Venus durante su paso sobre el Sol les resultaría más difícil.

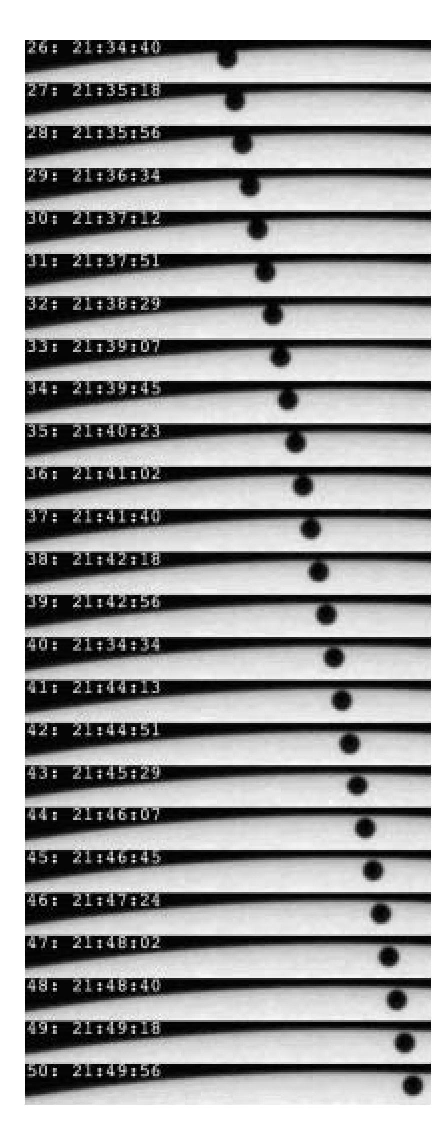
Cuando, finalmente, se produjo el tránsito, el 9 de diciembre de 1874, el mal tiempo dejó frustradas a muchas expediciones. Y no fue lo peor; el análisis posterior de las observaciones visuales del contacto mostró enseguida que no mejoraban las del siglo XVIII. El problema, en todas las partes del mundo, era el mismo. William Harkness, astrónomo del Observatorio Naval que dirigía el

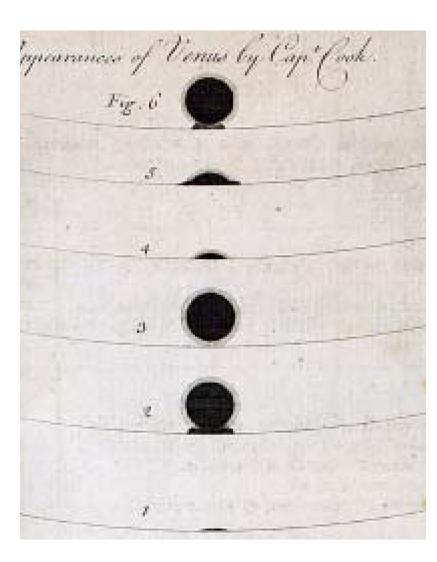
ASTLEY HALL

grupo de observación de Hobart Town, en la isla australiana de Tasmania, declaró que "la gota negra y las atmósferas de Venus y de la Tierra habían vuelto a producir una serie de fenómenos complejos, que se prolongaron a lo largo de un tiempo de muchos segundos; así era dificilísimo dar con el auténtico contacto".

Las observaciones fotográficas adquirían de este modo la máxima importancia. También decepcionaron. Harkness recordaba que "pronto se empezó a murmurar que las tomadas por los astrónomos europeos habían sido un fracaso". El informe oficial británico manifestaba que "al cabo de laboriosas mediciones y cálculos, se había considerado preferible abstenerse de publicar los resultados de las mediciones fotográficas, por ser comparables a las deducidas de la observación telescópica". Como Harkness decía, fue imposible determinar con precisión la posición de Venus contra el Sol porque los observadores no alcanzaban a delimitar con exactitud el contorno del disco solar: "Por muy definido que pareciera estar el limbo del Sol al observar las fotografías a simple vista, cuando se aplicaba un microscopio resultaba indiferenciado e imposible de contornear; el fino hilo del micrómetro desaparecía por completo cuando se le ponía sobre el limbo." Los franceses sí publicaron sus resultados, pero con amplios márgenes de error.

Todas las esperanzas se centraron en las expediciones norteamericanas, que habían regresado con unas 220 placas fotográficas medibles, tomadas con los fotoheliógrafos de gran distancia focal. En 1881, en vísperas del siguiente tránsito, se publicó un valor de 8,883 segundos de arco para la paralaje solar. Pero los resultados ofrecían la suficiente ambigüedad para que muchos astrónomos, entre ellos Newcomb, adujeran que el tránsito de Venus no era un procedimiento idóneo para determinar la unidad astronómica. Harkness, sin embargo, nunca perdió la fe, y con nuevas consignaciones presupuestarias aprobadas por el Congreso, EE.UU. montó ocho expediciones para observar el tránsito de 1882. Tras analizar durante más de un decenio las fotografías que se obtuvieron en esa ocasión, Harkness llegó a la conclusión de que el mejor valor de la paralaje solar era 8,809 segundos de arco, correspondientes a una distancia de la Tierra al Sol de 145.531.000 km, con un error probable de algo más de 96.000 km. La distancia media aceptada en la actualidad, obtenida por diversos métodos, entre ellos las observaciones desde ingenios espaciales, es de 149.565.977 km. (El valor correspondiente de la paralaje solar es de 8,794148.)





2. EL EFECTO DE LA "GOTA NEGRA" fue observado por el capitán Cook en el tránsito de Venus de 1769. Un dibujo basado en las observaciones de Cook (*arriba*) muestra cómo se "adhiere" el limbo de Venus al perímetro del Sol, haciendo imposible la determinación del momento preciso del contacto. Cook conjeturaba que podría deberse a que Venus tuviera atmósfera. Pero en 1999 el ingenio espacial TRACE, dedicado a la exploración de las regiones de transición y la corona del Sol, registró un fenómeno similar durante un tránsito de Mercurio, planeta que carece de atmósfera (*a la izquierda*). La causa de la gota negra sigue siendo controvertida.

GLENN SCHNEIDER, JAY M. PASACHOFF Y LEON GOLUB *Laboratorio Astrofísico y Solar Lockheed Martin y Observatorio Astrofísico Smithsoniano (izquierda)*; BIBLIOTECA DE CIENCIA, TECNICA E INGENIERIA LINDA HALL (*derecha*)

¿Qué importancia han tenido los tránsitos de Venus en la historia de la astronomía? Newcomb, cuyo sistema de constantes astronómicas se utilizaría internacionalmente a lo largo de gran parte del siglo XX, concedió a los tránsitos de Venus, pese a que adoptó para la paralaje solar un valor muy cercano al de Harkness, un peso muy pequeño con respecto a otros métodos de estimación de la constante. En su opinión, el efecto de la "gota negra" y otros errores mermaban mucho el valor del tránsito para la determinación de la unidad astronómica.

Vale la pena señalar que la causa de la gota negra sigue siendo motivo de gran controversia. Los astrónomos de los siglos XVIII y XIX lo atribuyeron a una variedad de causas, entre ellas las atmósferas tanto de Venus como de la Tierra. Pero cuando el satélite espacial TRACE ("Explorador de la región de transición y de la corona solar") observó en 1999 desde mucho más allá de la atmósfera terrestre el tránsito de Mercurio, planeta que carece de atmósfera, aún se percibió una débil gota negra (*véase la figura 2, a la izquierda*). Ello no obsta para que

los efectos atmosféricos puedan intensificar el efecto, pero la causa tiene que ser otra.

El equipo del TRACE (dirigido por Glenn Schneider, del Observatorio Steward de la Universidad de Arizona, por Jay M. Pasachoff, del Observatorio del Colegio Williams-Hopkins, y Leon Golub, del Observatorio Astrofísico Smithsoniano) ha llegado a la conclusión de que el efecto de gota negra se debe en parte a una difuminación óptica entre los discos planetario y solar. Encontramos un fenómeno similar cuando juntamos los dedos índice y pulgar hasta que casi se toquen y miramos hacia un fondo brillante a través de ese estrecho resquicio: aparecerá entre los dedos un "ligamento" oscuro a pesar de que no se están tocando. Además, el oscurecimiento del limbo solar —el decremento de brillo en el borde del Sol— contribuye también bastante a la gota negra. Los investigadores del TRACE han sugerido que aplicando nuevas técnicas en el tránsito de Venus que está a punto de producirse podría mitigarse esta vez el efecto.

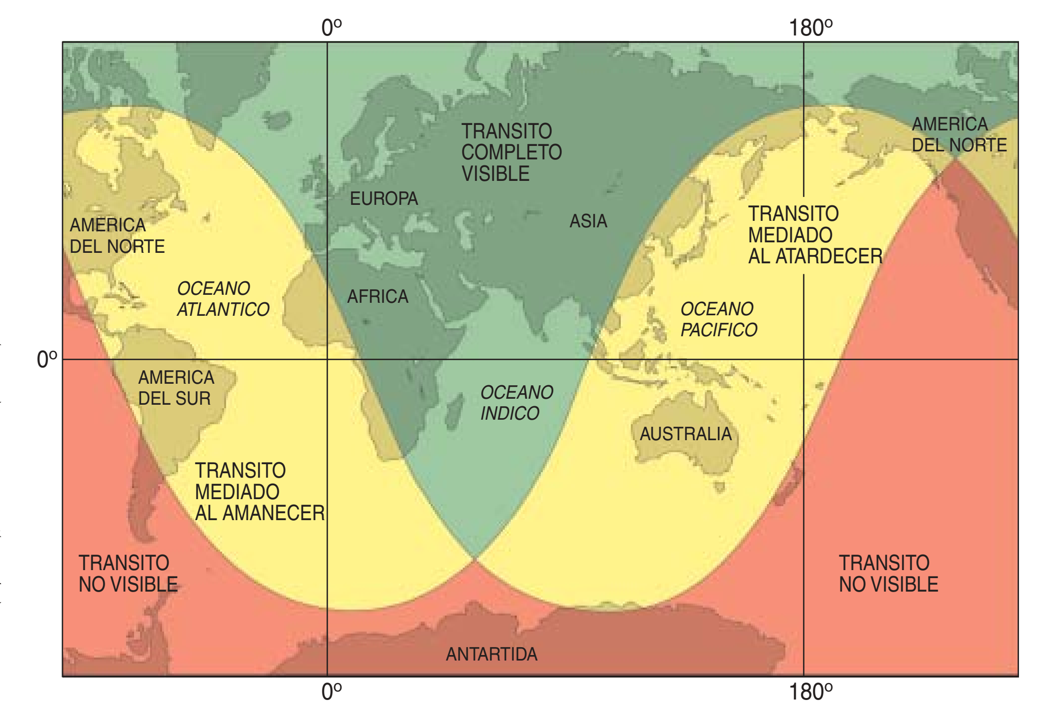
Ante todo, la seguridad

A pesar de que los tránsitos de Venus hayan dejado de ser importantes para la determinación de la unidad astronómica, el de este año será, sin duda, uno de los más observados de la historia de la astronomía. Resulta posible ver a Venus contra el disco del Sol incluso sin ampliación; ciertamente lo es con unos binoculares o un pequeño telescopio. Pero los observadores han de tomar las mismas precauciones que las empleadas para un eclipse de Sol. La observación del Sol a través de un telescopio desprovisto de los filtros apropiados puede provocar instantáneamente lesiones oculares y ceguera permanente.

Una de las formas más seguras de observar el tránsito consiste en proyectar las imágenes de Venus y del Sol sobre una hoja de papel. Los astrónomos aficionados, valiéndose de técnicas de observación de las ocultaciones de objetos celestes consagradas por el tiempo, pueden efectuar observaciones útiles de los tiempos de contacto, datos que deberían enviar, acompañados de sus coordenadas geográficas, a la sección de tránsitos de Mercurio y Venus de la asociación norteamericana de observadores lunares y planetarios. Tras el tránsito de 1882 fueron muchos los observadores que enviaron informes al Observatorio Naval de EE.UU.; todavía los conserva hoy en sus archivos nacionales.

Los redactores del manual de observadores de la Sociedad Real canadiense correspondiente a 2004 se han tomado la molestia de especificar la frecuencia media de cielos encapotados en numerosos puntos de la Tierra para la fecha del tránsito. Según este manual, los mejores puntos de observación se encuentran en Irak, en Arabia Saudita y en Egipto. Luxor, en Egipto, es el emplazamiento óptimo, con una probabilidad del 94 por ciento de cielos despejados según los registros históricos. Se han organizado cruceros al Nilo para los días del tránsito.

Al igual que el de 1882 encendió la imaginación de los jóvenes George Ellery Hale y Henry Norris Russell —dos pioneros de la astronomía del siglo XX—, tal vez los tránsitos de Venus del siglo XXI sirvan para animar a los jóvenes a estudiar astronomía. Con la esperanza de sacar el máximo provecho a las oportunidades educativas que ofrece, la Oficina de Ciencia Espacial de la NASA patrocina numerosas actividades que buscan la participación de estudiantes y del público en general. Un consorcio de instituciones europeas ha puesto en práctica parecidos planes. Una anécdota: la "Marcha del Tránsito de Venus", compuesta tras el de 1882 por John Philip Sousa, el legendario compositor norteamericano de música militar, ha sido resucitada y se vuelve a interpretar con frecuencia creciente tras haber per-





3. LOS MEJORES LUGARES para la observación del tránsito del 8 de junio de 2004 se encuentran en Europa, Asia y Africa. Los observadores de Australia y de buena parte de América sólo podrán ver partes del tránsito. En la mayor parte de México y en la parte meridional de Sudamérica el acontecimiento resultará inobservable. Para evitar lesiones oculares es preciso utilizar filtros (*arriba*).

NINA FINKEL (*izquierda*); CHUCK BUETER (*derecha*)



manecido en el olvido durante más de 100 años.

Tránsitos extrasolares

Entretanto, astrónomos profesionales de todo el mundo festejarán el tránsito mientras lo estudian. Al mismo tiempo que apuntan hacia el Sol sus telescopios terrestres y los instrumentos instalados en naves espaciales, la Unión Astronáutica Internacional celebrará una reunión cerca del lugar donde Horrocks observó el tránsito de 1639. Su Grupo de Trabajo para los Tránsitos de Venus está promoviendo la instalación de placas conmemorativas en los puntos donde se efectuaron observaciones de tránsitos anteriores.

El tránsito de Venus sigue siendo de interés para los investigadores porque ofrece una rara oportunidad al desarrollo de técnicas que permitan la detección y la caracterización de planetas en otros sistemas solares. La mayor parte de los 119 planetas extrasolares hallados hasta la fecha se descubrieron porque su gravedad provocaba leves movimientos periódicos en las estrellas en torno a las que orbitan. En 1999, sin embargo, se anunció la primera detección de un planeta basada en la disminución de la luz de una estrella al interponerse aquél entre ésta y la Tierra. Ese planeta, situado a 153 años luz de nuestro sistema solar, redujo en un 1,7 por ciento la luz de su estrella durante un tránsito que duró tres horas. A diferencia de las técnicas ordinarias de descubrimiento de planetas, las observaciones de tránsitos permiten la determinación del plano orbital del planeta extrasolar, gracias a lo cual cabe deducir su masa. Y puesto que el porcentaje de disminución de la luz indica el tamaño del planeta, cabe también deducir su densidad.

La NASA planea utilizar un ingenio espacial para descubrir planetas extrasolares observando sus tránsitos. La sonda Kepler, cuyo lanzamiento está previsto en 2007, se propone examinar unas 100.000 estrellas similares a nuestro Sol a lo largo de cuatro años. Sus fotómetros detectan diminutas variaciones en el brillo de una estrella; podrán encontrar planetas no mayores que la Tierra. Las observaciones del tránsito de Venus de este año contribuirán a la calibración de los instrumentos requeridos.

De este modo, la historia del tránsito de Venus ha cerrado el ciclo que va del hombre Kepler a la nave espacial Kepler. Newcomb, Harkness y sus contemporáneos quedarían sin duda alguna asombrados ante los avances de la astronomía desde el último tránsito de 1882. ¿Cuál será el estado de la ciencia y de la civilización cuando Venus vuelva a aproximarse al Sol en 2117? Es muy posible que para entonces se haya observado un tránsito de la Tierra desde Marte, como pronosticaba Arthur C. Clarke. Si el 10 de noviembre de 2084 hay seres humanos en Marte, podrán ver a su planeta materno atravesar lentamente la faz del Sol, una mota negra contra un fondo brillante.

El autor

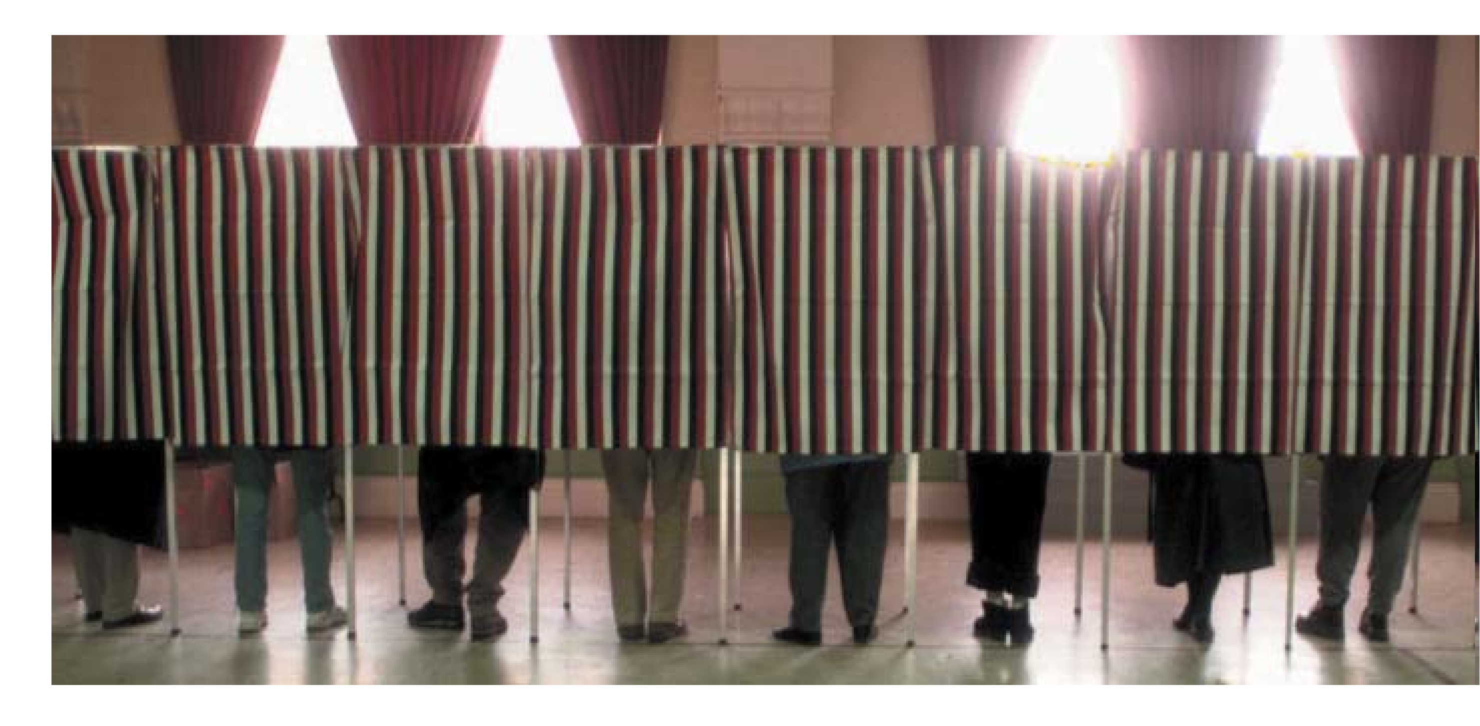
Steven J. Dick es historiador jefe de la NASA. Durante 25 años ha sido astrónomo e historiador de la ciencia en el Observatorio Naval de EE.UU., la institución que dirigió las expediciones norteamericanas que observaron los tránsitos de Venus en 1874 y en 1882. Ha presidido la comisión de historia de la astronomía de la Unión Astronómica Internacional, cuyo grupo de trabajo sobre el tránsito dirige en la actualidad.

Bibliografía complementaria

JUNE 8, VENUS IN TRANSIT. Eli Maor. Princeton University Press. 2000.

THE TRANSIT OF VENUS: THE QUEST TO FIND THE TRUE DISTANCE OF THE SUN. David Sellers. Magavelda Press, 2001.

THE TRANSITS OF VENUS. William Sheehan y John Westfall. Prometheus, 2003.



La elección más justa

Todos los sistemas electorales tienen inconvenientes. Pero al tomar en consideración la forma en que el cuerpo electoral ordena a los candidatos, hay un sistema que refleja mejor que los demás las intenciones del electorado

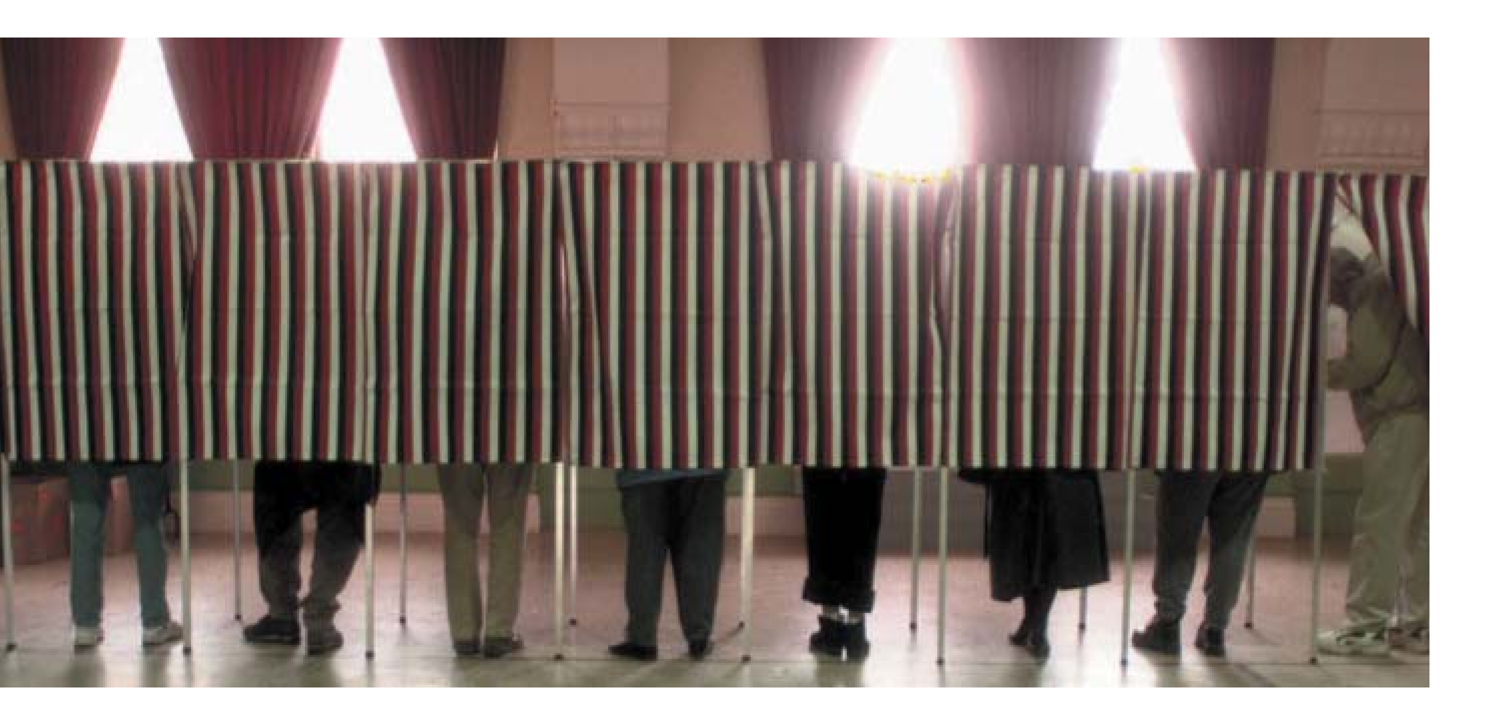
Partha Dasgupta y Eric Maskin

Son pocos los ciudadanos, sean españoles, estadounidenses, franceses o de cualquier otra de las democracias del mundo, que dediquen mucha reflexión a sus respectivos procedimientos electorales. Tal preocupación suele dejarse a politólogos y analistas. Ahora bien, en años recientes, una gran proporción de la población de estos dos últimos países ha quedado perpleja. En Francia se preguntaban cómo era posible que un político situado al margen de la tendencia política principal pudiese haber llegado a la elección final, que se hace entre dos candidatos, en las elecciones a la presidencia de 2002. En los Estados Unidos, muchos electores se preguntaban por qué el candidato más popular se quedó en la cuneta en el año 2000.

Dejaremos para los comentaristas políticos los debates sobre tarjetas perforadas defectuosas, papeletas en mariposa, de las peculiaridades del colegio electoral o el funcionamiento del Tribunal Supremo de los EE.UU. Nos ocuparemos, en cambio, de una cuestión más fundamental, partiendo de investigaciones propias y de colegas, a saber: ¿Qué clase de sistemas, sea para la elección de líderes nacionales o para delegados de alumnos en las universidades, se acerca más a la representación auténtica de la voluntad de los votantes? Los autores sostienen que existe un sistema concreto que sería óptimo a este respecto, y que tal sistema sería sencillo y práctico de implantar en Estados Unidos, en Francia y en muchos otros países.

La importancia de ordenar los candidatos

En la mayoría de los sistemas electorales, el votante no expresa su opinión acerca de todos los candidatos, estableciendo una jerarquía entre



TOBY TALBOT *AP Photo*; JOHNNY JOHNSON (*Fotoilustración*)

ellos. Se limita a escoger únicamente uno de ellos: su favorito. Si sólo contienden dos, tal simplificación no introduce cambio alguno. Pero si entran en liza tres o más, importa mucho la diferencia entre jerarquizarlos o elegir uno solo.

Tenemos un caso claro en las elecciones a la presidencia francesa de 2002. Los electores, en la primera vuelta, podían votar a uno entre nueve candidatos. Sobresalían el presidente en funciones, Jacques Chirac, del partido gaullista, el líder socialista Lionel Jospin y el candidato del Frente Nacional, Jean-Marie Le Pen. La ley electoral estipula que si ningún candidato obtiene directamente una mayoría absoluta, aquellos dos que cuenten con mayor número de votos han de enfrentarse en una segunda vuelta. En la primera, ganó Chirac (con un 19,9 por ciento de los votos). La auténtica sorpresa, sin embargo, estuvo en el segundo puesto: lo ocupó el candidato ultraderechista Le Pen (con un 16,9 por ciento). En la segunda ronda Chirac venció a Le Pen de forma aplastante.

A pesar de que Jospin quedó en el tercer puesto, todos los datos disponibles indicaban que, en un enfrentamiento contra Le Pen, el socialista hubiera ganado sin dificultad. De haber llegado a la segunda ronda, resultaba incluso plausible que hubiera vencido al propio Chirac. Sin embargo, el sistema electoral francés, al imponer a los votantes la necesidad de optar entre los dos primeros, no puede tomar en cuenta semejante información. Permite, además, que candidatos extremistas como Le Pen —sin auténticas posibilidades de ganar— ejerzan un efecto apreciable sobre el resultado final.

En los Estados Unidos, la elección presidencial del año 2000 puso de manifiesto anomalías similares. Para mayor claridad de nuestra tesis, vamos a suponer que el procedimiento de elección es más sencillo de lo que realmente fue. Consideraremos tan sólo a los cuatro candidatos principales; supondremos que no existe diferencia entre la votación popular y la votación del colegio electoral. (Han sido muchas las quejas que ha suscitado el colegio electoral, pero aun cuando fuese reemplazado por el voto popular seguirían planteándose problemas serios.) Supondremos también que hay sólo cuatro categorías de electores: los que prefieren a Ralph Nader frente a Al Gore, a Gore frente a George W. Bush, y a Bush frente a Pat Buchanan (a los que llamaremos votantes “Nader”); los que prefieren el orden Gore, Bush, Nader, Buchanan (votantes “Gore”); los de la ordenación Bush, Buchanan, Gore, Nader (votantes “Bush”); y los de preferencia Buchanan, Bush, Gore, Nader (votantes “Buchanan”).

Para mayor concreción, supongamos que los votantes Nader constituyan el 2 por ciento del electorado; los de Gore, el 49 por ciento; los de Bush, el 48 por ciento, y el 1 por ciento, votantes de Buchanan. Si los votantes eligen cada uno un candidato, el 49 por ciento de los votos irán a Gore y el 48 por ciento a Bush (los porcentajes reales fueron de 48,4 y 47,9 por ciento, respectivamente). Dado que ninguno de los candidatos logra una mayoría absoluta (es decir, más del 50 por ciento), ¿cómo se determinará el vencedor? Puesto que Gore logra la mayoría relativa (es el más votado, aunque no llegue al 50 por ciento), tal vez debiera ser el vencedor.

Pero la Constitución estadounidense estipula que, de no producirse una mayoría absoluta de votos electorales, corresponde al Congreso determinar el ganador. En el año 2000 el partido republicano tenía mayoría en el Congreso; presumiblemente optaría por Bush. Como vemos, si los estadounidenses se limitan a indicar su candidato favorito, el resultado no refleja necesariamente sus opiniones.

Al igual que en las elecciones francesas, tal ambigüedad se resuelve permitiendo que los electores expresen el orden de sus preferencias. Aunque Gore sólo sea el favorito del 49 por ciento del electorado, las ordenacio-

nes dejan ver que una clara mayoría del 51 por ciento —la suma de votantes de Gore y Nader— antepone a Gore frente a Bush o Buchanan. De este modo, Gore resultará elegido de acuerdo con un sistema electoral llamado regla de auténtica mayoría (o regla de mayoría simple), en la que cada votante expresa su voluntad ordenando según sus preferencias a todos los candidatos; el vencedor es quien supera a cada uno de sus rivales al ser comparados por parejas según esta clasificación.

También se utilizan ordenaciones en otros sistemas electorales. Fijémonos, por ejemplo, en la "votación por puntos", procedimiento frecuente para elegir miembros de comités. Se ha propuesto para resolver los problemas inherentes a los sistemas de elección presidencial de Francia y de Estados Unidos. Si fueran cuatro los candidatos, cada votante asignaría cuatro puntos a su favorito, tres al siguiente, dos al tercero por orden de preferencia y uno al menos deseado. Vence el candidato que sume mayor número de puntos. Según parece, el método fue inventado por un ingeniero francés del siglo XVIII, Jean-Charles Borda, en cuyo homenaje se denomina "recuento de Borda".

Supongamos que en la elección presidencial estadounidense votasen 100 millones de personas. Basándonos en nuestra hipótesis anterior, sabemos que 49 millones de ellas habrían puesto a Gore en primer lugar. A Gore se le asignarían, pues, 196 millones de puntos —es decir, 49 millones de veces 4 puntos— correspondientes a los votantes "Gore". Los votantes de Nader le situarían en segunda posición, por lo que recibirá de ellos 6 millones de puntos. Por último, los votantes de Bush y de Buchanan le situarían en tercer lugar, asignándole así otros 98 millones de puntos, con un total de 300 millones de puntos para Gore. Al efectuar los cómputos correspondientes a los demás candidatos, resultaría que Nader conseguiría 155 millones de puntos, y Buchanan, 199 millones. Llama la atención que Bush consiga 346 millones, a pesar de que la mayoría simple del electorado prefiera a Gore (*véase el supuesto A en el recuadro* "Votación por puntos: Diversos supuestos"). Solamente el 2 por ciento de los electores coloca a Bush por debajo del segundo puesto, un resultado suficiente para concederle la victoria en el sistema de votación por puntos.

Resumen/Representación correcta del voto

- No existe un sistema de votación que sea perfecto: todos los procedimientos presentan algún tipo de fallo.
- Sin embargo, sí hay un método que podría resolver algunos de los problemas surgidos en las recientes elecciones francesas y estadounidenses. Tal sistema, llamado "regla de auténtica mayoría", incorpora información referente a la preferencia de candidatos, lo que permite una representación más adecuada de las opiniones de los electores.
- Nuestro modelo teórico demuestra que la regla de mayoría auténtica elude con mayor frecuencia que otras los fallos que se presentan en otras reglas de votación. Y, lo que es importante, sería fácil de implantar en países de todo el mundo.

Como vemos, la regla de mayoría auténtica y la votación por puntos conducen a resultados profundamente diferentes. Habida cuenta de este tajante contraste puede parecer difícil decidir cuál de los dos procedimientos refleja mejor la voluntad de los votantes. Eso es justamente lo que nos proponemos. Podemos evaluar estos dos sistemas —y cualquier otro— atendiendo a ciertos principios fundamentales que todo método electoral debería cumplir. En 1951, Kenneth J. Arrow, de la Universidad de Stanford, desarrolló, en una monografía, esta aproximación axiomática a la teoría de las votaciones. Un trabajo que ha moldeado la bibliografía sobre votaciones.

La mayoría de los analistas admitirían que todo buen sistema electoral debería satisfacer ciertos axiomas. Uno de ellos es el principio de consenso, también llamado principio de Pareto, en honor del sociólogo italiano Vilfredo Pareto. Enuncia este principio que, si todos se hallan de acuerdo en que el candidato A es superior a B, no se debe elegir a B. Este axioma no contribuye, empero, a discriminar entre la regla de auténtica mayoría y la de votación por puntos, porque ambos métodos lo satisfacen, es decir, B acabaría perdiendo en uno y otro métodos. Tal principio, por otra parte, no es de frecuente aplicación. En nuestro ejemplo de las elecciones estadounidenses no existe una preferencia unánime de un candidato sobre otro.

Otro importante axioma sostiene que todos los votantes deben contar por igual: es el principio de "una persona, un voto" o principio de indiferencia. Los teóricos lo llaman también principio de anonimato: la influencia que tengamos en el resultado de una votación no debe depender de quienes seamos. Las reglas de mayoría auténtica y de votación por puntos cumplen, también, el principio de anonimato.

Existe un tercer criterio, sin embargo, que sí discrimina entre las dos. Se trata del axioma de neutralidad, principio que consta de dos componentes. El primero es la simetría, lo que significa que las reglas electorales no deben favorecer a un candidato más que a otro. El segundo estipula que la decisión de los votantes al optar entre los candidatos A y B no debe depender de cómo valoren a un tercer candidato, C. ¿Qué ocurriría en nuestro ejemplo estadounidense si la ordenación de los votantes que sitúan a Bush en primer lugar se trocase en Bush, Gore, Buchanan, Nader (en lugar de Bush, Buchanan, Gore, Nader)? Con la norma de mayoría auténtica, no sucedería nada importante: la mayoría seguiría prefiriendo a Gore frente a Bush. Pero fijémonos en lo que ocurre en la votación por puntos: Gore recibiría ahora 348 millones de puntos, frente a 346 de Bush (*véase el supuesto B en el recuadro* "Votación por puntos: Diversos supuestos"). Ahora es Gore quien gana, en lugar de hacerlo Bush.

Evidentemente, la votación por puntos puede infringir la regla de neutralidad. Las preferencias de los electores entre Gore y Buchanan, un candidato sin posibilidades de ser elegido, determinan el resultado entre Bush y Gore... y el resultado de las elecciones. La regla de mayoría auténtica, en cambio, siempre respeta la neutralidad. Este último aserto puede causar cierta

TOBY TALBOT *AP Photo*

perplejidad en aquellos lectores que recuerden que en la verdadera elección hubo abundante discusión acerca de si los votos a favor de Nader afectarían a la competición entre Bush y Gore. De hecho, en retrospectiva, parece que Nader —con la ayuda, tal vez, de las infames papeletas de votación de Florida, los dípticos llamados "mariposas"— pudo haber desviado un número suficiente de votos favorables a Gore como para inclinar la balanza a favor de Bush. Pero tal efecto, consecuencia de su peculiar sistema electoral, solamente fue posible porque el sistema de EE.UU. no se atiene a la regla de mayoría auténtica.

La regla de la mayoría en el caso francés

Examinemos lo que hubiera ocurrido en la elección presidencial francesa de 2002 con la regla de mayoría auténtica, a la que, desde ahora, denominaremos por sencillez "regla de mayoría". Supongamos que Chirac, Jospin y Le Pen sean los únicos candidatos y que el electorado está dividido en tres grupos. Todos los votantes del primer grupo, que son un 30 por ciento, adoptan la ordenación Jospin, Chirac, Le Pen. En el segundo grupo, el 36 por ciento del electorado, la ordenación es Chirac, Jospin, Le Pen. En el tercer grupo, 34 por ciento, los electores sitúan a Le Pen sobre Chirac y Jospin. En tal caso, Chirac y Le Pen, con un 36 y 34 por ciento de los votos, respectivamente, pasarían a la segunda ronda, en la que Chirac prevalecería sobre Le Pen debido a que el 66 por ciento de los votantes le anteponen al jefe del Frente Nacional.

El mismo resultado se obtendría todavía con otro sistema, llamado de eliminación instantánea por votación (EIV), que se practica en Irlanda y en Australia. Igual que el de la votación por puntos, se ha propuesto éste como alternativa a los sistemas estadounidense y francés. Expuesto con sencillez, en la EIV la junta electoral se encarga de ir eliminando a los candidatos que ocupan los puestos más bajos (incorporando sus porcentajes a los de los candidatos inmediatamente superiores en la ordenación dada por los votantes) hasta que sólo subsisten dos candidatos.

Ahora bien, el sistema francés y el de eliminación instantánea entran en conflicto con la regla de la mayoría. Si examinamos la configuración de las preferencias de los electores, veremos que Jospin realmente encabeza una mayoría abrumadora: el 64 por ciento del electorado le prefiere a Chirac, y el 66 por ciento, a Le Pen. La regla de la mayoría dicta que, en esas elecciones, Jospin debería ganar de una forma apabullante (*véase el recuadro* "Elección presidencial francesa de 2002").

Recordemos que, con la regla de mayoría, un votante puede hacer una declaración política sin perjuicio para las opciones de ninguno de los candidatos elegibles. Podría darse el caso de una persona que, prefiriendo a Jospin sobre Chirac y sabiendo que Le Pen no tenía posibilidades de vencer, se decidiese por situar al ultraderechista en primer lugar como gesto de protesta, sin temor a expulsar a Jospin de la carrera. (Excepto, claro está, en el caso muy improbable de que una mayoría de otros votantes hicieran otro tanto.) Una situación análoga sería que un votante prefiriese

SLIM FILMS

VOTACION POR PUNTOS: DIVERSOS SUPUESTOS

EN ESTE SISTEMA ELECTORAL el votante le asigna a cada candidato cierto número de puntos y se hallan las puntuaciones totales de cada uno. Es de señalar que aunque un candidato fuese el ganador en la regla de mayoría auténtica, como lo sería Gore en el supuesto A, no necesariamente resultará el vencedor por el sistema de puntuación. Pero una ligera variación en las preferencias, como sucede con los votantes de Bush en el supuesto B, puede provocar una enorme diferencia. En este caso le daría la victoria a Gore.

Supuesto A

URNA

PUESTO DEL CANDIDATO	PUNTOS ASIGNADOS	TOTAL DE VOTOS (en millones)
VOTANTES DE GORE (49%) (de 100 millones de votos)		
Gore	4	4 × 49 = 196
Bush	3	3 × 49 = 147
Nader	2	2 × 49 = 98
Buchanan	1	1 × 49 = 49
VOTANTES DE NADER (2%)		
Nader	4	4 × 2 = 8
Gore	3	3 × 2 = 6
Bush	2	2 × 2 = 4
Buchanan	1	1 × 2 = 2
VOTANTES DE BUSH (48%)		
Bush	4	4 × 48 = 192
Buchanan	3	3 × 48 = 144
Gore	2	2 × 48 = 96
Nader	1	1 × 48 = 48
VOTANTES DE BUCHANAN (1%)		
Buchanan	4	4 × 1 = 4
Bush	3	3 × 1 = 3
Gore	2	2 × 1 = 2
Nader	1	1 × 1 = 1
		Total de Gore: 300
		Total de Bush: 346

Supuesto B

URNA

VOTANTES DE BUSH (48%)		
Bush	4	4 × 48 = 192
Gore	3	3 × 48 = 144
Buchanan	2	2 × 48 = 96
Nader	1	1 × 48 = 48
		Total de Gore: 348
		Total de Bush: 346

a Gore frente a Bush, y votase a Nader con intención de simbolizarle su simpatía.

Mas, a pesar de estas virtudes, la regla de mayoría tiene un fallo: puede infringir otro principio bien aceptado para las votaciones, la transitividad. El principio de transitividad exige que, si el candidato A es preferido al B, y el B prima sobre el C, entonces A debe ser preferido a C. Ahora bien, olvidemos a Buchanan y supongamos que el 35 por ciento del electorado antepone a Gore frente a Bush, y a Bush frente a Nader;

que el 33 por ciento prefiere a Bush sobre Nader, y a Nader sobre Gore; y que el 32 por ciento sitúa a Nader sobre Gore, y a Gore sobre Bush. Entonces el 67 por ciento de los votantes sitúa a Gore sobre Bush, el 68 por ciento, a Bush sobre Nader, y el 65 por ciento, a Nader sobre Gore. Dicho de otro modo, quienquiera que sea el candidato elegido, al menos el 65 por ciento de los electores prefieren a otro. En este caso, la regla de mayoría no produce un vencedor.

Esta posibilidad, conocida por paradoja de Condorcet, fue identificada en las postrimerías del siglo XVIII por Marie-Jean-Antoine-Nicholas de Caritat, marqués de Condorcet, colega y archicrítico de Borda. Las tres ordenaciones —Gore sobre Bush sobre Nader, Bush sobre Nader sobre Gore, y Nader sobre Gore sobre Bush— constituyen, en su globalidad, lo que se conoce por un ciclo de Condorcet.

Tras este análisis comparado, la regla de mayoría y la regla de ordenación parecen haber quedado en tablas: la regla de mayoría satisface a todos los principios, excepto el de transitividad, y la regla de ordenación, todos excepto el de neutralidad. Nos vemos abocados así a preguntarnos si existe algún otro sistema electoral que cumpla todos los axiomas. El famoso teorema de imposibilidad de Arrow afirma que no; sostiene que todo sistema electoral habrá de infringir en algunas ocasiones al menos uno de los principios [*véase* “Decisiones racionales colectivas”, por Douglas H. Blair y Robert A. Pollack; en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1983].



PAPELETA ELECTORAL de las primeras elecciones libres celebradas en la República Sudafricana en 1994. El 62 por ciento del electorado eligió a Nelson Mandela y al Partido del Congreso Nacional Africano.

Ideologías y valores

Pero el teorema de Arrow es indebidamente negativo. Exige que el método electoral deba satisfacer a un axioma dado, independientemente de cuáles resulten ser las ordenaciones de los electores. Ahora bien, ciertas ordenaciones son inverosímiles. En particular, la paradoja de Condorcet —la pifia que comete la regla de mayoría— puede no constituir un problema serio en la práctica. Después de todo, las ordenaciones de los votantes no salen de la nada. Con frecuencia manifiestan su ideología.

Para ver qué consecuencias entraña la ideología para la regla de mayoría, imaginemos representada la posición de cada candidato en un espectro que vaya de la izquierda a la derecha política. Al irnos desplazando de izquierda a derecha seguramente encontraremos a los candidatos presidenciales del año 2000 en el orden Nader, Gore, Bush, Buchanan. De constituirse la ideología en responsable de las opiniones de los votantes, es probable que cualquier votante que anteponga a Nader frente a Gore sitúe a Gore por delante de Bush, y a Bush, por delante de Buchanan. Análogamente, es de prever que los votantes que prefieran a Bush frente a Gore, prefieran también al vicepresidente demócrata frente a Nader. No son de esperar las ordenaciones Bush, Nader, Gore, Buchanan.

En un artículo seminal publicado en los años cuarenta del siglo pasado, Duncan Black, de la Escuela Universitaria de Gales del Norte, demostró que si las preferencias de los votantes derivaban de su ideología en la forma explicada —o, al menos, si no eran demasiados los votos “no ideológicos”— la regla de mayoría cumpliría el principio de transitividad. Este descubrimiento abrió nuevos surcos en ciencias políticas, porque, al postular las ordenaciones ideológicas de los candidatos por parte de los votantes, resultaba posible sortear la paradoja de Condorcet y efectuar predicciones claras sobre el resultado de la regla de mayoría.

Los votantes, parece obvio, no siempre se amoldarán linealmente, de izquierda a derecha, en un espectro tan pulcro. Existen otras situaciones que también garantizan la transitividad. Por dar un ejemplo, volvamos a tomar la elección francesa. Aunque Chirac y Jospin encabezasen los dos partidos principales, no suscitaban gran entusiasmo. Era el candidato extremista, Le Pen, el que provocaba la repugnancia o entusiasmo del público; las pruebas indican que eran una enorme mayoría quienes le colocaban en primer o en tercer lugar entre los candidatos principales; pocos, en cambio, le situaban de segundo. Es discutible si tal polarización convenía o no a Francia. Pero es incues-



JACK GUEZ *AFP/Corbis (Jospin)*; DANIEL JANIN *AFP/Corbis (Chirac)*; FRANÇOIS GUILLOT *Reuters NewMedia/Corbis (Le Pen)*

tionablemente buena para la regla de mayoría. Si los electores están de acuerdo en que uno de los tres candidatos no puede quedar en segundo lugar, la transitividad se hallará garantizada. Esta propiedad, de "restricción de valores", fue introducida en 1966 por Amartya Sen, de la Universidad de Harvard.

En nuestra investigación sobre sistemas de votación, decimos que un sistema de votación es idóneo, o que funciona bien, para una determinada clase de ordenaciones por preferencia, si satisface a los cuatro axiomas cuando todas las ordenaciones de los votantes pertenecen a esa clase. Por ejemplo, la regla de la mayoría resulta idónea cuando todas las preferencias están ideológicamente ordenadas. También es idónea cuando todas las ordenaciones tienen "restricción de valores". Más todavía, hemos descubierto que siempre que un sistema de votación merece reputarse idóneo, también opera la regla de mayoría. Además, la regla de mayoría funciona bien en algunos casos donde otros sistemas fallan. Hemos llamado a este resultado "teorema de dominancia" de la regla de mayoría.

Para ilustrarla con un ejemplo, imaginaremos una triple competición entre Gore, Bush y Nader. Supongamos que cada votante sitúe a los candidatos en uno de los dos órdenes siguientes: Gore, Bush, Nader, o Bush, Gore, Nader. Al pertenecer las ordenaciones de los votantes a esta clase de dos elementos, la votación por puntos verifica su némesis: el principio de neutralidad (porque la opinión que los votantes tengan de Nader a si es Bush o Nader quien gana una elección por puntos). Ahora bien, la regla de mayoría opera también en este caso, porque satisface a su némesis, la transitividad.

Pero la votación por puntos ya no funciona bien si la situación se vuelve un poco más complicada. Si añadimos una tercera ordenación —Gore, Nader, Bush—, la regla de mayoría mantiene su propiedad transitiva. Tomadas en conjunto, estas tres ordenaciones no constituyen todavía un ciclo de Condorcet. La votación por puntos, sin embargo, ya no satisface al axioma de neutralidad. Supongamos que el 51 por ciento pone a Bush por encima de Gore, y a éste, sobre Nader. Si el 49 por ciento restante sitúa a Gore sobre Nader y a Nader sobre Bush, el vencedor será el vicepresidente demócrata. En cambio, si ese 49 por ciento hubiera dicho Gore, Bush, Nader, entonces es Bush quien gana, a pesar incluso de que este grupo de 49 por ciento sitúa a Bush por detrás de Gore en ambos casos.

Aunque la regla de mayoría deja de ser idónea todavía en algunas ocasiones, como revela la paradoja de Condorcet, ello ocurre con menor frecuencia que con otras normas de votación. En tales casos se necesita modificarla para que genere un vencedor. Ello puede conseguirse de muchos modos. La modificación más sencilla pudiera ser ésta: si nadie obtiene una mayoría frente a todos sus oponentes al enfrentarlos dos a dos, se selecciona como vencedor a quien logre la máxima suma en una votación por puntos.

Perfeccionar las elecciones del futuro

No hay país en el mundo con un sistema electoral perfecto, exento de fallos. Tanto la elección presidencial estadounidense del año 2000 como la francesa de 2002 resultaron afectadas de forma importante —quién sabe si decisiva— por candidatos que no tenían una probabilidad verosímil de ganarlas. Dichos candidatos pudieron ejercer influencia porque, en cada caso, sólo se tomó en cuenta el candidato más valorado de cada votante. Estamos convencidos de que cuando se presentan más de dos opciones, los electores deberían emitir una ordenación de sus candidatos y que debería ser la regla de mayoría, en la forma en que la hemos explicado, la que determinase el vencedor. Tal método no sería perfecto: ningún método lo es. Pero, como expresa el teorema de dominancia, se aproximaría más a una representación precisa de los deseos de los votantes que cualquier otro sistema.

Los autores

Partha Dasgupta y **Eric Maskin** colaboran a menudo en sus investigaciones; entre otras, en trabajos recientes sobre teoría de subastas. Dasgupta ocupa la cátedra Frank Ramsey de Economía en la Universidad de Cambridge y ha sido presidente de la Regia Sociedad de Economía. Maskin, a cargo de la cátedra Albert O. Hirshmann de Ciencias Sociales en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, ha sido presidente de la Sociedad Econométrica.

Bibliografía complementaria

THE THEORY OF COMMITTEES AND ELECTIONS. Duncan Black, Cambridge University Press, 1958. [Kluwer Academic Publishers, 1998.]

COLLECTIVE AND SOCIAL WELFARE. Amartya Kumar Sen. Holden-Day, 1970. [North-Holland, 1984.]

ON THE ROBUSTNESS OF MAJORITY RULE AND UNANIMITY RULE. Partha Dasgupta y Eric Maskin. Disponible en www.sss.ias.edu/papers/papers/econpapers.html

Cambio climático
y distribución geográfica de las especies

Hoy existen pruebas suficientes para asegurar que la Tierra está viviendo un proceso de calentamiento que no ocurría por lo menos en el último milenio. Estudios recientes han mostrado que ello se debe, en gran medida, al aumento de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, ozono, metano y halocarburos), resultado de las actividades humanas relacionadas con la combustión de hidrocarburos. Las predicciones indican que el clima cambiará todavía más en los próximos 100 años, aumentando la temperatura media mundial entre 1,8 y 5,6 ºC.

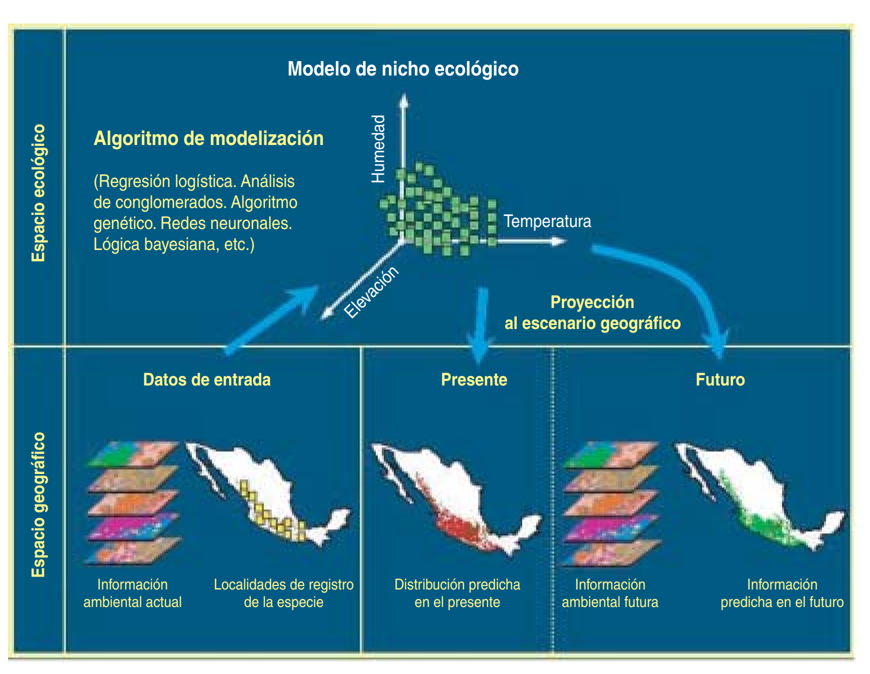
El cambio climático conlleva efectos negativos para el hombre, así como para el resto de especies que habitan el planeta: cada año se producen más tormentas que inundan regiones enteras o sequías tan severas, que provocan incendios devastadores. Constituye quizá la amenaza más importante para la biodiversidad en un futuro cercano. Está alterando la distribución geográfica de plantas y animales. Algunas especies están desplazando sus límites de distribución hacia los polos o hacia altitudes mayores, unas veces aumentando y otras reduciendo su extensión geográfica.

Científicos de diversas partes del mundo —entre las que México ocupa un lugar destacado— han comenzado a abordar este problema mediante el desarrollo de un nuevo campo: la modelización de nichos ecológicos. En esta metodología, el nicho ecológico se equipara a las condiciones ambientales bajo las cuales la población de una especie puede prosperar indefinidamente sin la necesidad de inmigración de individuos de otra población. Este concepto define los límites de tolerancia de una especie ante las condiciones climáticas, así como ante ciertos factores de las especies interactuantes (densidad de competidores, presas, etc.). Por tanto, el nicho de una especie determina en gran medida su distribución y abundancia.

La teoría del nicho ecológico (que comenzó a desarrollarse desde principios del siglo XX) establece que las especies tienden a mantener sus hábitats constantes durante largos períodos de tiempo; incluso millones de años. Así, ante alteraciones climáticas de gran magnitud las especies generalmente se trasladan "siguiendo" las condiciones ambientales a las que están adaptadas. Por ello, podemos esperar que en este episodio de calentamiento la mayoría de las especies sufran modificaciones concomitantes con el clima, en sus distribuciones geográficas.

El primer paso de esta modelización consiste en recopilar datos sobre los sitios donde medra la especie de interés. Al propio tiempo, se compilan mapas digitales de precipitación, temperatura, altitud y otras variables ambientales. Luego, esta información se somete a un algoritmo que identifica las condiciones ambientales adecuadas para la especie; es decir, construye el modelo de nicho ecológico. Existen varios algoritmos aptos para este tipo de modelización, que se agrupan en dos grandes bloques según su enfoque: estadístico (regresiones múltiples, análisis de conglomerados...) o heurístico (árboles de decisión, algoritmos genéticos, redes neuronales...). Después, se localizan los sitios que ofrecen las condiciones ambientales propias del nicho; se obtiene así la distribución geográfica de la especie en el presente.

Para estimar, por fin, la distribución geográfica de la especie en el futuro, sólo necesitamos saber dónde deberá trasladarse ésta para encontrar las condiciones ambientales que necesita para vivir. Para ello basta comparar el modelo de nicho de la especie en estudio con las predic-



La modelización de nichos ecológicos a partir de las condiciones ambientales permite predecir la repercusión del cambio climático en la distribución de las especies. La figura muestra el caso mexicano del conejo montés *Sylvilagus cunicularius*.

ciones ambientales derivadas de los modelos de circulación general (escenarios climáticos desarrollados por los expertos).

Este procedimiento constituye un paso sustancial en la modelización de nichos ecológicos, pero todavía tiene ciertas limitaciones. En primer lugar, las predicciones climáticas presentan altos índices de incertidumbre. El clima está condicionado por fenómenos muy complejos, bastante desconocidos todavía. Además, el futuro climatológico depende de un factor difícil de predecir: la actividad humana, especialmente la relacionada con las emisiones de gases. En segundo lugar, la modelización simplifica demasiado la realidad. Prescinde de algunos elementos que afectan a la distribución de las especies, pero que no se han incorporado a los algoritmos porque todavía no se comprenden bien; por ejemplo, cómo afecta la presencia de una especie en un lugar determinado a su interacción con otras especies (competencia, depredación, etc.), cambio potencial de interacciones en el futuro, migración de la especie en el futuro o cómo afecta la fragmentación del hábitat, la presencia humana o de especies con las que anteriormente no había interaccionado.

A pesar de estas limitaciones, merece la pena continuar con el desarrollo de esta disciplina emergente. Los resultados obtenidos hasta ahora son muy prometedores y la incorporación de más científicos en esta área de la ecología permitirá llenar los vacíos de conocimiento, mejorar la metodología y ampliar el estudio a un número mayor de especies. La pregunta crítica es si esto se logrará a tiempo para mitigar la actual crisis ecológica.

ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER
CLAUDIA BALLESTEROS BARRERA
Instituto de Biología,
Universidad Nacional Autónoma
de México

Microelectrónica

Autodifusión en antimoniuro de galio

La autodifusión o difusión de los átomos de un material en su propia red cristalina es el proceso fundamental de transporte de masa en los sólidos. Se realiza con la participación de defectos puntuales: las vacantes, que son sitios de la red sin su átomo correspondiente, o los intersticiales, que son átomos situados en una posición fuera de la red cristalina rodeados por átomos de la red. Estos defectos constituyen la base para la difusión de las impurezas o átomos de otros elementos en el interior de los materiales.

El conocimiento de los mecanismos de autodifusión y de difusión de impurezas en semiconductores y su cuantificación es imprescindible para el desarrollo de nuevos dispositivos electrónicos y optoelectrónicos. Se fabrican éstos a partir de heteroestructuras semiconductoras, formadas por el apilamiento de capas de semiconductores diferentes o por capas impurificadas intencionadamente, que les confieren propiedades específicas.

La difusión de átomos puede ser intencionada para conseguir perfiles de impurezas adecuados. Pero puede resultar perjudicial, cuando se pretende obtener heteroestructuras muy abruptas. La tendencia actual en la industria microelectrónica va hacia una disminución progresiva del tamaño de los dispositivos con el fin de aumentar su velocidad y nivel de integración. Se entra así en el campo de la nanoelectrónica (nano = 10^{-9}), donde los tamaños característicos son inferiores a la millonésima de metro. El control de la difusión resulta más crítico en dispositivos nanométricos, ya que miden sólo decenas o centenas de espaciados atómicos.

Para el estudio de la autodifusión en los semiconductores se utilizan estructuras semiconductoras fabricadas con isótopos diferentes de los elementos constituyentes. Esto nos permite hacer un seguimiento de los diversos átomos dentro de una red cristalina constituida por un mismo elemento, pues los isótopos tienen diferente masa atómica (distinto número de neutrones), aun siendo del mismo elemento (mismo número de protones).

Se trata de una línea de investigación abordada ya en numerosos semiconductores: germanio, silicio, arseniuro de galio (GaAs) y fosfuro de galio (GaP). En el caso de los semiconductores compuestos GaAs y GaP se limitó a la autodifusión del galio, utilizando sus dos isótopos estables, ^{69}Ga y ^{71}Ga.

Recientemente, en el Instituto de Microelectrónica de Madrid (CNM-CSIC), en colaboración con la Universidad de California y el Laboratorio Nacional Lawrence, en Berkeley, hemos llevado a cabo el estudio de la autodifusión en antimoniuro de galio (GaSb); se ha podido realizar para sus dos elementos, pues ambos tienen dos isótopos estables. El antimoniuro de galio y sus aleaciones derivadas poseen un gran potencial para la fabricación de emisores láser en el infrarrojo, de detectores en el infrarrojo medio y, debido a su alta movilidad electrónica, de transistores de alta velocidad de conmutación de hasta 100 gigahertz. Todos estos dispositivos constituyen la base para la mejora de los sistemas de comunicación actuales, se basen en fibra óptica o sean inalámbricos. Por tanto, la utilización del GaSb, aunque reciente, ha despertado un gran interés en la industria electrónica y optoelectrónica.

En los estudios de difusión se analiza el movimiento de los átomos dentro del material al someterlo a tratamientos térmicos, ya que éstos favorecen la difusión. Para analizar los átomos que componen un material, se recurre a la espectroscopía de masas de iones secundarios (SIMS); se genera así un perfil de composición en profundidad. Esta técnica mide la concentración de átomos con una masa determinada en función de la profundidad en que se encuentran en el cristal. Para ello se van arrancando progresivamente átomos mediante el bombardeo con iones (en nuestro caso de oxígeno o cesio), procedentes de un cañón que los acelera a energías del orden de 1 kiloelectronvolt. De la medida de los átomos arrancados por el choque de los iones se obtiene el perfil en profundidad de la distribu-



Vista interior del reactor MBE con el que se han fabricado las multicapas semiconductoras

ción de los diferentes átomos en la lámina. El cambio en la distribución inicial de los átomos durante los tratamientos térmicos nos permitirá conocer el coeficiente de autodifusión de cada elemento.

Las estructuras necesarias para la realización de este estudio, compuestas por varias capas de GaSb en las que se han alternado los isótopos que las forman, han sido fabricadas en el centro español. Se ha utilizado la técnica de epitaxia por haces moleculares (MBE), que permite un mayor control en la fabricación de estas estructuras, obteniéndose intercaras abruptas. La necesidad de introducir los cuatro isótopos más los elementos en su composición isotópica natural ha obligado al desarrollo de nuevas células de efusión para el reactor de ultraalto vacío en el que se realiza la fabricación.

Se fabricaron estructuras de capas alternas de $^{69}Ga^{121}Sb/^{71}Ga^{123}Sb$ a una temperatura de 450 ºC y después de tratamientos térmicos entre 500 ºC y 700 ºC fueron medidas por SIMS en Berkeley. Se observó que, mientras la distribución de antimonio no cambia apenas, los átomos de galio se mueven apreciablemente con la aplicación de un tratamiento térmico de 2 horas a 700 ºC y se llega a una distribución prácticamente homogénea después de 2 días a esa temperatura.

De esta forma se determinaron los coeficientes de difusión y se observó una disparidad entre el antimonio y el galio de tres órdenes de magnitud. Tal diferencia, insólita en procesos de difusión en sólidos, se ha asociado a que cada elemento tiene un mecanismo de difusión diferente. El galio se mueve dentro de la red a través de las vacantes de galio, cuya concentración aumenta con la temperatura.

Pero, según nuestros resultados, el antimonio se difunde a través de los intersticiales, que disminuyen su concentración al aumentar la temperatura. La disminución se debe a una curiosa reacción entre los intersticiales de antimonio y las vacantes de galio: el antimonio se sitúa en la posición de galio, ya que esta posición (conocida como antisitio) es más favorable desde el punto de vista energético, en razón de su menor energía electrónica, y queda así inmovilizado.

La importancia de esa vía investigadora es patente a la hora de diseñar dispositivos basados en GaSb. Como se ha demostrado, el galio se difunde de forma normal en semiconductores y puede intercambiarse con otras capas contiguas. Sin embargo, el antimonio nos garantiza la estabilidad en su posición.

JUAN PEDRO SILVEIRA MARTÍN
FERNANDO BRIONES FERNÁNDEZ-POLA
Instituto de Microelectrónica
de Madrid (CNM-CSIC)

La falla activa de Padul

Medidas geodésicas para controlar su deformación

No hay mayor sismicidad en toda la península Ibérica que en el sector central de la cordillera Bética (se extiende por partes de las provincias de Granada, Málaga y Almería). Presenta una actividad sísmica caracterizada por terremotos de magnitud baja (M<5), aunque ocasionalmente sufre terremotos de mayor magnitud, como lo demuestran las referencias históricas. Cada siglo, más o menos, se produce un terremoto destructor en nuestro país. El último terremoto catastrófico ocurrido en España, conocido como el “terremoto de Andalucía”, tuvo lugar precisamente en la provincia de Granada, el 25 de diciembre de 1884. Destruyó totalmente el pueblo de Arenas del Rey, provocando grandes daños en otros próximos, como Ventas de Zafarraya, Alhama de Granada y Játar. Se estima que causó casi 800 muertos y más de 1500 heridos. Derribó cerca de 5000 casas; más de 6000 quedaron en ruinas.

En los últimos años, se han realizado varios estudios geológicos y geofísicos encaminados a identificar y analizar las principales fallas activas responsables de esta sismicidad. Varios trabajos, basados en datos geológicos, han estimado que los movimientos de estas fallas tienen una velocidad tan pequeña (décimas de milímetro al año), que necesitan ser estudiados mediante técnicas geodésicas de gran precisión.

Los estudios para el control de deformaciones en fallas activas por métodos geodésicos se han desarrollado considerablemente en los últimos años, a nivel internacional. Basta ver la amplia cantidad de publicaciones científicas realizadas sobre California (Estados Unidos), Japón, Nueva Zelanda, América Central, Grecia, etc. En nuestro país hasta ahora sólo se habían establecido algunas redes geodésicas de control a escala regional, pero no se había diseñado ninguna red para el análisis de una falla concreta.

Por este motivo, el grupo de investigación "Microgeodesia Jaén", de la Universidad de Jaén, ha diseñado un estudio geodésico cuyo objetivo principal es cuantificar la deformación de algunas fallas activas del sector central de la cordillera Bética. El análisis de las campañas de observación que se lleven a cabo a lo largo de los años, permitirá cuantificar los desplazamientos que actualmente se están produciendo en esta región; a buen seguro, proporcionará un conocimiento mucho más detallado sobre el riesgo sísmico que llevan asociado.

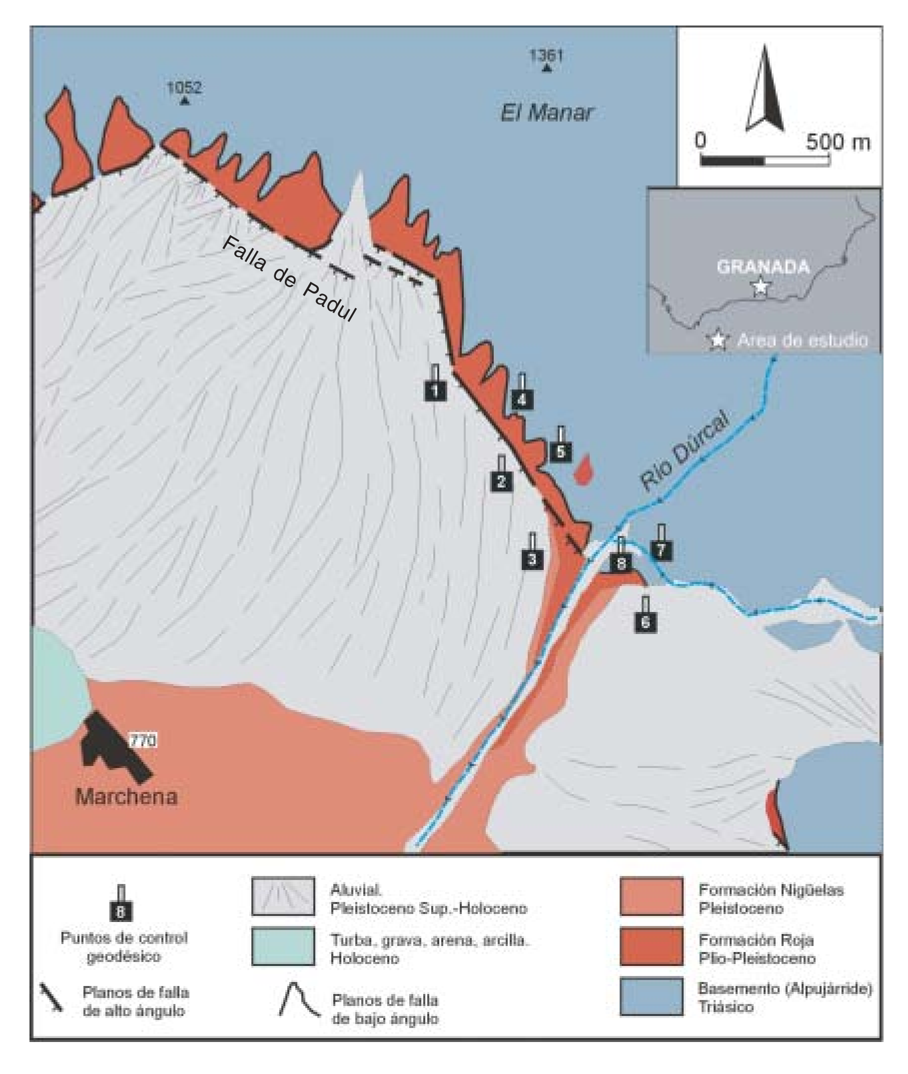
Una de las fallas seleccionadas para este estudio es la de Padul, también denominada falla de Padul-Nigüelas. Es probablemente la que muestra mayores indicios geomorfológicos de actividad reciente en todo el sector central de la cordillera Bética. Aflora al sur de la población de Acequias y se extiende hacia el noroeste a lo largo de unos 15 km. Es una falla normal, que afecta a rocas carbonatadas del Triásico de la zona interna de la cordillera Bética. En superficie, tiene una morfología aproximadamente plana, con un buzamiento medio de 40º, aunque también alcanza valores extremos de 20º y 80º.



1. Panorámica del plano de falla de la falla de Padul que pone en contacto las rocas carbonatadas del Triásico (*color grisáceo*) y las rocas detríticas de edad del Plio-Cuaternario (*color rojizo*). En primer plano, uno de los vértices de la red de control geodésico construidos en la zona.

El índice de actividad sísmica a lo largo de la falla de Padul es muy bajo. No existen registros históricos de que hayan ocurrido terremotos de magnitud moderada-alta a lo largo de su trazado. En el período 1980-1996 sólo se ha producido un terremoto con una magnitud algo mayor de 3,5. Sin embargo, en el registro geológico más reciente hay indicaciones de que la falla de Padul continúa activa (abanicos aluviales deformados en los últimos miles de años, escarpes de falla sin erosionar, fuerte encajamiento de la red de drenaje, etc.). Según los cálculos geológicos, desde el Mioceno Superior (hace aproximadamente 8 millones de años) hasta la actualidad el desplazamiento vertical de esta falla ha sido de 800 m. Algunos geólogos, comparando las diferentes altitudes de los sedimentos cuaternarios afectados por esta falla, han calculado que el desplazamiento vertical medio es de 0,3 mm/año.

Para corroborar estos resultados y obtener un conocimiento más detallado de la deformación actual que está produciendo la falla, en 1998 se estableció una red geodésica local que cubría más de 1 km de su traza en el sector situado en el Barranco de los Lobos, junto al río Dúrcal (término municipal de Dúrcal, Granada). Esta red consta de ocho vértices geodésicos (cuatro en cada bloque), materializados en hormigón armado y un dispositivo especial de centrado forzoso. Las ob-



2. Mapa geológico del entorno de la falla de Padul, con los vértices de la red geodésica local materializados sobre ella.

servaciones con instrumentación geodésica clásica (medida de ángulos y distanciometría electrónica) se han efectuado en tres campañas diferentes, en 1999, 2000 y 2001. Los primeros resultados obtenidos tras el análisis arrojan que las posibles deformaciones que se producen en esta falla, tanto en la horizontal como en la vertical, son submilimétricas. Como los errores de las estimaciones realizadas están a ese mismo nivel, el estudio pone de manifiesto que no se detecta deformación en el período 1999-2001. Habrá que esperar más años y seguir realizando nuevas campañas para que la deformación (supuestamente inferior a 1 mm/año) pueda ser lo suficientemente grande como para ser detectada por estos métodos geodésicos.

Esta investigación, pionera en España por utilizar técnicas geodésicas clásicas sobre una falla activa concreta, también tiene interés internacional, ya que analiza el comportamiento de una falla de actividad moderada-baja (décimas de milímetro al año) cuando lo habitual es analizar fallas con velocidades de varios milímetros e, incluso, centímetros al año.

ANTONIO M. RUIZ ARMENTEROS
y ANTONIO J. GIL
Depto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Escuela Politécnica Superior de Jaén. Universidad de Jaén

CARLOS SANZ DE GALDEANO
Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, C.S.I.C., Universidad de Granada

PEDRO ALFARO
Depto. Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente, Universidad de Alicante

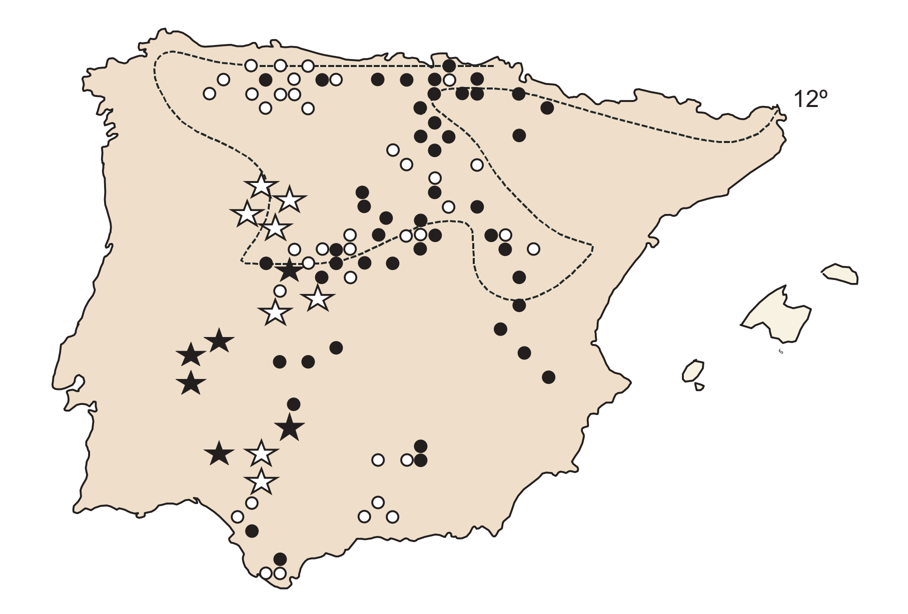
Los pájaros de las dehesas

Biodiversidad e invernada en un sistema modificado por el ser humano

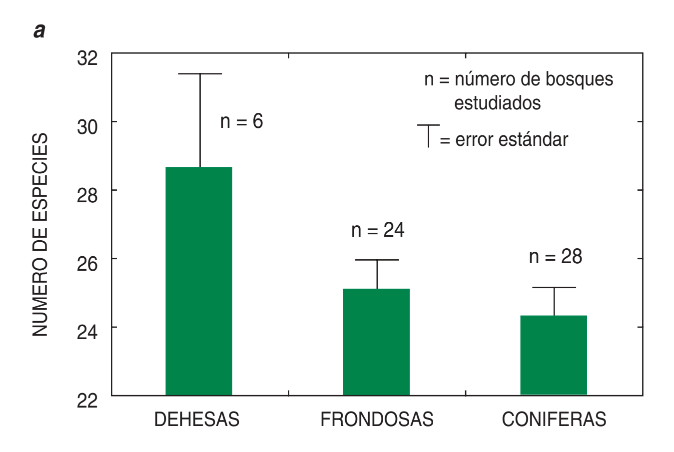
Las dehesas son pastizales arbolados que cubren más de dos millones de hectáreas en el cuadrante suroccidental ibérico. Su fisonomía está dominada por un estrato poco denso de encinas y alcornoques, árboles con aspecto de parasol, bajo el que se extiende un tupido pastizal. Este es labrado periódicamente para evitar la proliferación del sotobosque y favorecer el pastoreo del ganado. Las dehesas ibéricas ayudan a la conservación de la fauna. Muchos grandes vertebrados (ungulados, carnívoros, buitres, águilas...) se benefician de los recursos, protección y tranquilidad de las grandes fincas en las que se enclavan. En otoño, miles de grullas y millones de palomas torcaces del centro y norte de Europa las ocupan para invernar, aprovechando las bellotas y los rebrotes de unos pastos ya humedecidos por las lluvias de otoño. Además, estos pastizales arbolados son famosos por la variedad de plantas herbáceas que, en determinadas parcelas, llegan a alcanzar diversidades equivalentes o superiores a las de los famosos bosques tropicales. No ha de extrañarnos, por lo tanto, que estén considerados como un sistema agrícola modélico por sus positivas implicaciones en la conservación de la naturaleza.

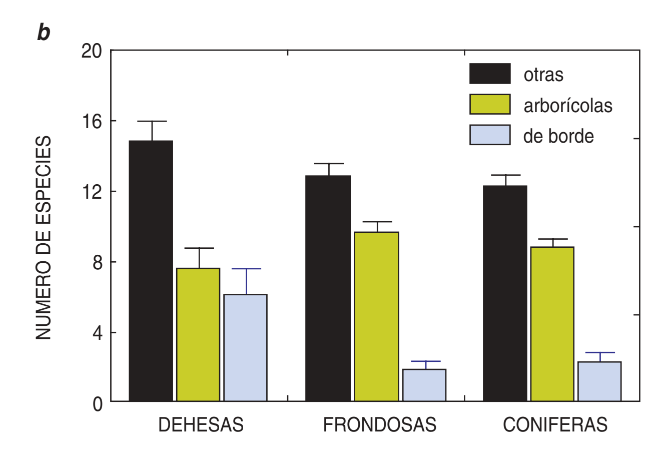
Las comunidades de pájaros (Orden Passeriformes, Clase Aves) de las dehesas han sido estudiadas desde muchas perspectivas, pero sólo recientemente se ha iniciado la evaluación de su interés conservacionista. Para ello, se ha comparado el número de especies que las ocupan (un índice habitual en estos estudios) con el de otras formaciones arboladas del resto de la península. Los resultados, publicados previamente en la revista *Animal Biodiversity and Conservation*, han permitido avanzar dos conclusiones generales.

En primer lugar, las dehesas parecen albergar comunidades reproductoras de pájaros extraordinariamente ricas en especies. Este es un resultado interesante: dado que los bosques suelen tener más aves que los medios desarbolados, nos permite suponer que las dehesas son uno de los medios más ricos en pájaros del entorno ibérico. Esto parece contradecir las hipótesis actuales sobre la distribución de la avifauna forestal europea. Diversos estudios han demostrado que la mayoría de los pájaros forestales están adaptados a las condiciones centroeuropeas (clima húmedo, bosques desarrollados), por lo que tienden a rarificarse o desaparecer en los países mediterráneos (sequía estival,



1. Distribución de los bosques (*puntos*) y dehesas (*estrellas*) analizados en las figuras 2 (*estrellas y puntos en negro*) y 3 (*en blanco*). La isoterma de los 12º (temperatura media anual) delimita los sectores más fríos de la península Ibérica.





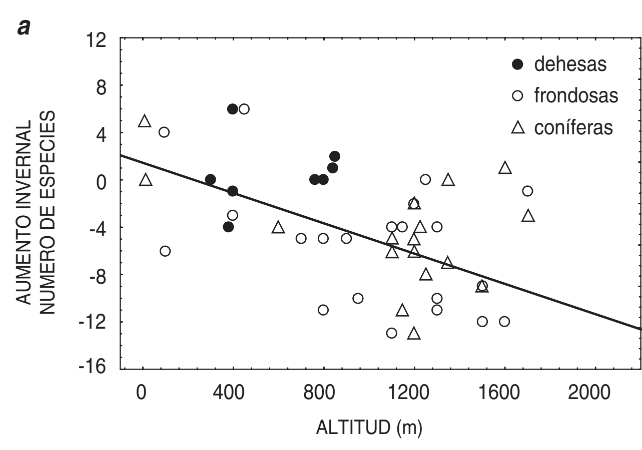
2. Diferencias en el número medio (y error estándar) de especies (*a*) y en la composición de las comunidades de aves (*b*) entre las dehesas y otros bosques. Las especies arborícolas son las que comen y crían en los árboles (carboneros, agateadores, trepadores, etc.); las de borde son las propias de ambientes abiertos o deforestados (cogujadas, lavanderas, collalbas, tarabillas, alcaudones, escribanos, etc.).

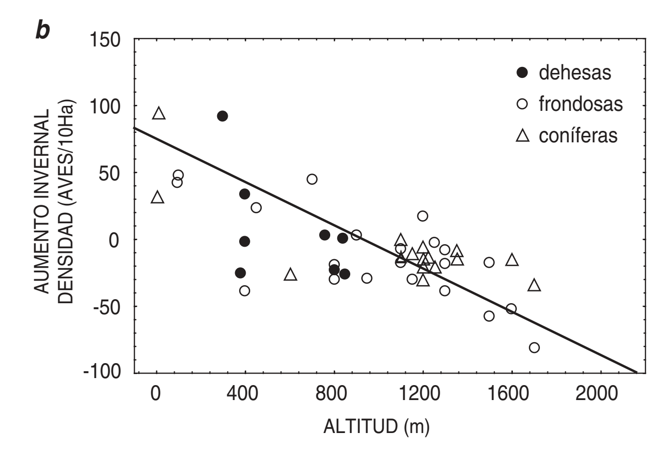
vegetación esclerófila, es decir, resistente a la sequedad, de hoja dura). La gran riqueza de especies en las dehesas del extremo meridional de Europa parece deberse, sin embargo, a la forma en que el hombre ha modelado su estructura. El adehesado del bosque suele producir un aumento de riqueza de especies siempre que la eliminación del arbolado no supere un determinado umbral, tras el cual habrá una drástica pérdida de especies. La estructura de bosque abierto de las dehesas permite la instalación de muchas especies que, como las cogujadas, collalbas, trigueros o alcaudones, son típicas de ambientes poco arbolados. Como contrapartida, se dificulta el asentamiento de algunas especies típicas de los bosques más densos y enmarañados, hoy escasas en muchos puntos del sur ibérico (*véase la figura 2*).

En segundo lugar, las comunidades de pájaros de las dehesas son sensibles a la estacionalidad ambiental. Todos sabemos que la llegada del invierno modifica la estructura de las comunidades de aves, pues muchos de estos animales se desplazan hacia sectores más cálidos donde pasar esa época. Por esta causa, las aves de las montañas y mesetas ibéricas tienden a perder aves a favor de los sectores más bajos (*véase la figura 3*). Aunque las dehesas mantienen, en promedio, más especies de pájaros invernantes que otros bosques ubicados a altitudes similares, no destacan por las altas densidades que albergan durante este crítico período. A diferencia de lo que ocurre con las palomas y las grullas (dos especies herbívoras), los pájaros no parecen encontrar en estos pastizales arbolados, ubicados en una excelente zona de invernada para las aves europeas, la disponibilidad de alimento (frutos e insectos...) que les brindan otros encinares o alcornocales de su entorno, que no han sido adehesados y cuentan con un sotobosque rico en arbustos productores de frutos (lentiscos, acebuches, etc.) y muy propicios para la búsqueda de insectos. Se limita así la posibilidad de que las dehesas participen en el mantenimiento invernal de ciertos pájaros migradores europeos (zorzales, currucas, etc.). Puede concluirse, por lo tanto, que la conservación de pequeños rodales de estos arbustos en esos inmensos pastizales arbolados aumentaría notablemente su importancia como hábitat de invernada.

José Luis Tellería
Depto. de Zoología,
Facultad de Biología
Universidad Complutense, Madrid

3. Aumento invernal en la riqueza de especies (*a*) y en la densidad (*b*) de una serie de comunidades de aves censadas en primavera e invierno a lo largo del gradiente altitudinal ibérico.





Covadonga Orejas, Tanja Joschko, Alexander Schröder y Rainer Knust



© AWI

1. Imagen de la cámara submarina en el momento de ser conducida por control remoto hacia el mar.

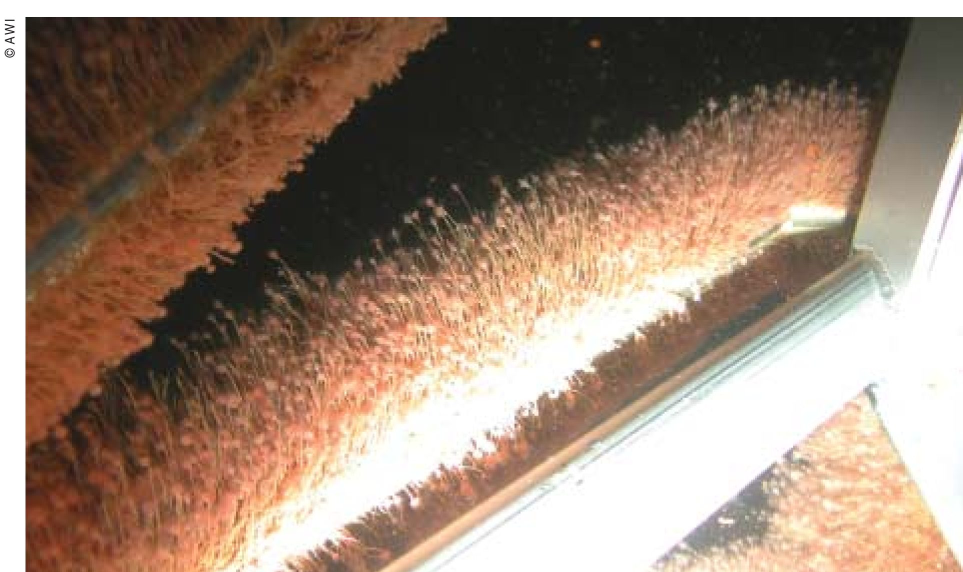
Ritmo trepidante de la sucesión ecológica en el mar del Norte

Desde junio de 2003 un gigante de acero se eleva 20 metros sobre el nivel del mar. Anclado en sus profundidades, FINO-1, así se llama esta plataforma situada en las cercanías de la isla Borkum, en pleno mar del Norte, tiene por misión ayudar a conocer los efectos ejercidos por los generadores de energía eólica sobre la vida bentónica y su entorno.

Entre otros ingenios, aloja una cámara digital submarina, manejada desde el Instituto Alfred Wegener de Bremerhaven, que nos permite registrar, con frecuencia semanal, la colonización de un substrato duro y artificial por organismos marinos. En el mar del Norte predominan los lechos blandos; los suelos duros, escasos, se encuentran a muchas millas de distancia de la plataforma.

En torno a FINO-1 la vida se desarrolla a un ritmo vertiginoso Al cabo de un mes de su instalación, los pilares de asentamiento se hallaban tapizados de pequeños hidrozoos. Transcurridos 30 días más, los hidrozoos se mostraban en fase de desaparición para ceder sitio a cierta especie de briozoo, que, a la manera de una ameba, se iba extendiendo en todas direcciones hasta terminar por cubrir el soporte de acero. Cumpliendo la ley de la naturaleza de la lucha entre depredadores y presas, un nudibranquio no tardó en aparecer junto al briozoo, ingesta favorita de ese polícromo caracol sin concha.

En octubre, dos meses después de la toma de las primeras imágenes, la escena había sufrido un cambio total. Apenas si quedaba rastro de los hidrozoos pioneros. En muchas zonas había desaparecido también el segundo poblador, el briozoo, víctima en unos casos de la voracidad del nudibranquio y, en otros, de la competencia por el espacio. Los anfípodos empezaron a abrirse sitio con sus moradas tubulares típicas. Sin embargo, no todo es lucha desesperada por quedarse con el territorio. Se produce una suerte de compromiso entre los distintos inquilinos, en virtud del cual cada uno va asentándose en su nicho respectivo. Así, los anfípodos conviven con las actinias; en razón de la profundidad se van diversificando los organismos. ¡Hasta una gonela encontró acomodo en la polea que guía la cámara en su viaje hacia el fondo del mar! Un zoom en la vida privada del bentos del mar del Norte que permite conocer no sólo la evolución de la comunidad, sino también el ritmo al que ocurre y los fenómenos de sucesión y competencia por el alimento y el espacio.



© AWI

2. En agosto los hidrozoos cubrieron la superficie del soporte de la cámara y del pilar de la plataforma.

3. En septiembre, los hidrozoos fueron desplazados por los briozoos. Al mismo tiempo, aparecieron ejemplares del nudibranquio, voraz predador de estos briozoos. ¿Cuáles son las posibles causas de esta sustitución? ¿Predación, competencia por el espacio o por el alimento? Desentrañar las causas y mecanismos de este proceso es uno de los objetivos fundamentales del proyecto llevado a cabo por los biólogos del Instituto Alfred Wegener.



© AWI

4. Imagen submarina tomada en octubre de 2003. Las construcciones tubulares realizadas por anfípodos y poliquetos han desplazado al briozoo en muchas zonas del pilar y ocupan la superficie del mismo.

© AWI

© AWI

5. FINO parece ser un hogar acogedor para muchos organismos. A esta gonela le gusta la polea que sujeta el cable de acero.

La constante de Hubble y el universo en expansión

El valor de H_0, la velocidad de expansión del universo, podría, merced a su refinamiento reciente, allanar el camino de la investigación cosmológica

Wendy Freedman

Quizá sea yo la única astrónoma que se haya quedado encerrada en una especie de jaula en lo más alto de un gran telescopio. Fue en la cumbre del Mauna Kea, a más de 4000 metros de altura. Hace veinte años, antes de que pasáramos las noches en cálidas salas de ordenadores, los astrónomos observábamos en pequeñísimos cubículos situados en el foco primario de los telescopios gigantes. Aunque las largas noches de invierno eran insoportablemente frías, contemplábamos hermosas vistas del oscuro cielo nocturno y escuchábamos música con auriculares mientras registrábamos imágenes y espectros de nuestros blancos celestes. Una noche, terminada la sesión, un ascensor se quedó atascado y no pude abandonar la jaula. No fue un inconveniente menor: el lavabo más cercano quedaba doce metros más abajo y yo estaba, no fue muy agradable, embutida en un doble mono de esquí. Pasaron siete horas antes de que un grupo de ingenieros subiera desde el nivel del mar, trepara por la cúpula del telescopio y liberara el ascensor con una palanca. ¿Por qué nos sometíamos los astrónomos a tales estrecheces?

Como cosmóloga dedicada a la observación, puedo decir que las satisfacciones compensan con creces las incomodidades ocasionales. Pretendemos entender la formación y la evolución del universo. Para ello, recurrimos a observaciones y experimentos que como respuesta nos proporcionan números: los valores de los parámetros cosmológicos. Aprendemos así acerca del universo: cuánta materia contiene, si está curvado o es plano, incluso cómo acabará quizá. Para comprender el significado de estos números y el porqué de que se persiga su determinación, se requiere un breve repaso de la historia.

La moderna ciencia de la cosmología se basa en la relatividad general —la teoría de la gravitación de Albert Einstein—, cuyas ecuaciones describen el comportamiento global de la materia, la energía y el espaciotiempo. Algunas soluciones de estas ecuaciones, especialmente las encontradas por el matemático ruso Alexander Friedmann en el decenio de 1920, sugieren que el universo nació de una "gran explosión" (*big bang*) en un estado muy denso y caliente. Desde entonces se ha estado expandiendo. La dinámica de la expansión se expresa mediante las ecuaciones de Friedmann, que describen la evolución del universo según su densidad y geometría. Su aplicación exige que sepamos el valor de algunos parámetros que contienen: H, el parámetro de Hubble, que define el ritmo de la expansión; Ω_m, la densidad de masa del universo; y Ω_k, la curvatura del universo. La ecuación no determina sus valores. Hay que medirlos.

Los primeros esfuerzos por realizar esas mediciones se remontan a 1929, año en que Edwin Hubble descubrió que nuestro universo se expandía. Demostró que cuanto más alejada de nosotros esté una galaxia, más deprisa se separa de nosotros. A esta relación velocidad-distancia se la llama hoy ley de Hubble. El ritmo *actual* de expansión es H_0. Hubble fue el primero en medirlo; dedujo un valor de 500 kilómetros por segundo por megapársec. (Un pársec es igual a 3,26 años luz.) Por distintas razones, ese resultado caía lejos de la realidad, pero incluso hasta hace poco más de tres años, las estimaciones de H_0 variaban en un factor dos; en general, se hallaban entre 50 y 100 (sus valores se suelen dar sin las unidades de medida).

Esta falta de precisión resultaba muy perjudicial, ya que H_0 es un parámetro clave, necesario para estimar tanto la edad como el tamaño del universo. Un factor de dos en H_0 se convierte en un intervalo inaceptablemente ancho para la edad del universo: entre 10 y 20 mil millones de años. Con tal incertidumbre, pocas restricciones había para los modelos cosmológicos.

Pero ya no es así. H_0, junto con algunos otros parámetros cosmológicos, va siendo cada vez más susceptible de medidas precisas, al paso que nuevas técnicas nos han permitido observar el universo a distancias mayores de lo que jamás había sido posible. El telescopio espacial Hubble (TEH), puesto en órbita en 1990, es uno de tales avances técnicos. Entre las principales razones por las que se construyó, se encontraba la de



CORTESIA DE NASA, HUBBLE HERITAGE TEAM/STScI/AURA Y WENDY FREEDMAN/*American Scientist*

1. LA GALAXIA ESPIRAL NGC 4414 se nos aleja, arrastrada por la expansión del universo. El ritmo al que se expande el universo, descrito por la constante de Hubble, se determina midiendo las velocidades y las distancias de las galaxias. Sin embargo, la medición precisa de galaxias distantes resulta muy difícil. El lanzamiento del Telescopio Espacial Hubble en 1990 facilitó la tarea. La NGC 4414 se halla casi a 19,1 megapársecs de distancia (unos 62 millones de años luz), y se aleja a una velocidad de unos 1400 kilómetros por segundo.

determinar H_0 con mayor precisión. *Key project* (Proyecto clave) se denominó el programa del TEH encaminado a conseguirlo. Participaron 30 astrónomos (yo fui una de los tres responsables) y concluirlo llevó ocho años de trabajo y cerca de 1000 horas del tiempo del TEH. Fue el mayor proyecto de los acometidos por el telescopio en su primer decenio. Quedó acabado en 2001.

Una variable y una constante

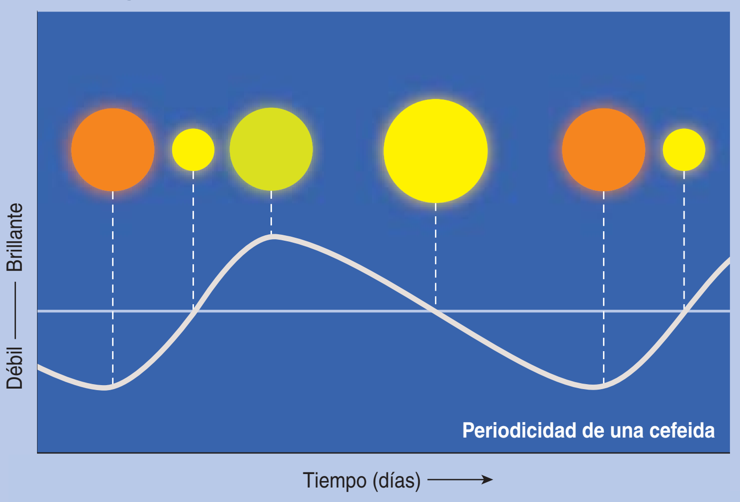
En principio, la constante de Hubble debería ser un cálculo sencillo. Sólo requiere la medida de la distancia y la velocidad de una galaxia. Sin embargo, en la práctica, diseñar un método para medir distancias a escalas cosmológicas dista de resultar trivial. Incluso medidas de velocidad que parecen bastante sencillas se complican porque las galaxias suelen tener otras cerca. La mutua interacción gravitatoria perturba sus movimientos. Las consiguientes *velocidades peculiares* difieren de las velocidades de recesión (la *corriente de Hubble*) de las galaxias en el universo en expansión. Hay que descontar o minimizar este efecto.

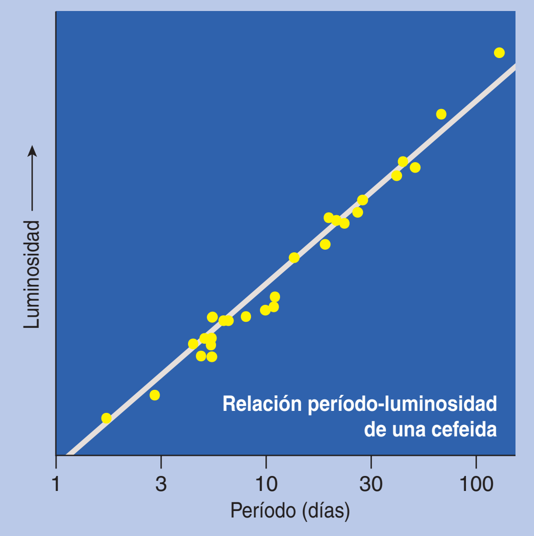
La velocidad de una galaxia se calcula a partir del desplazamiento observado de las líneas de su espectro (el patrón de las longitudes de onda de la radiación electromagnética que emite). Las galaxias que se están alejando de nosotros emiten luz desplazada hacia longitudes de onda mayores (más rojas); se estira, o "corre hacia el rojo", a causa de la recesión. Cuanto mayor sea el desplazamiento de la longitud de onda, mayor será la velocidad de la galaxia. Como la velocidad de recesión es proporcional a la distancia (de nuevo la ley de Hubble), cuanto más lejos se puedan hacer las medidas de distancia, menor será la repercusión proporcional de las velocidades peculiares en la velocidad de expansión global. Aún cabe reducir más la incertidumbre tomando un cierto número de galaxias distribuidas por el cielo, de manera que los movimientos peculiares se promedien.

La medida de las distancias presenta dificultades aún mayores. No existe el equivalente cosmológico de un telémetro terrestre; el universo es tan grande, que ningún método puede medir su tamaño absoluto. Hay que recurrir a una serie de técnicas, cada una de ellas adecuada para un cierto intervalo de distancias. El conjunto de estos métodos construye la "escala de distancias cosmológicas".

La distancia de las estrellas más cercanas puede medirse mediante la paralaje trigonométrica, que aprovecha el diámetro de la órbita de la Tierra para efectuar, por medio de la simple trigonometría escolar, una triangulación. Las estrellas más lejanas de nuestra galaxia y los objetos extragalácticos requieren otros indicadores de la distancia menos directos. En estos casos, se toman objetos que presentan un brillo cons-

Una alejada candela en la oscuridad



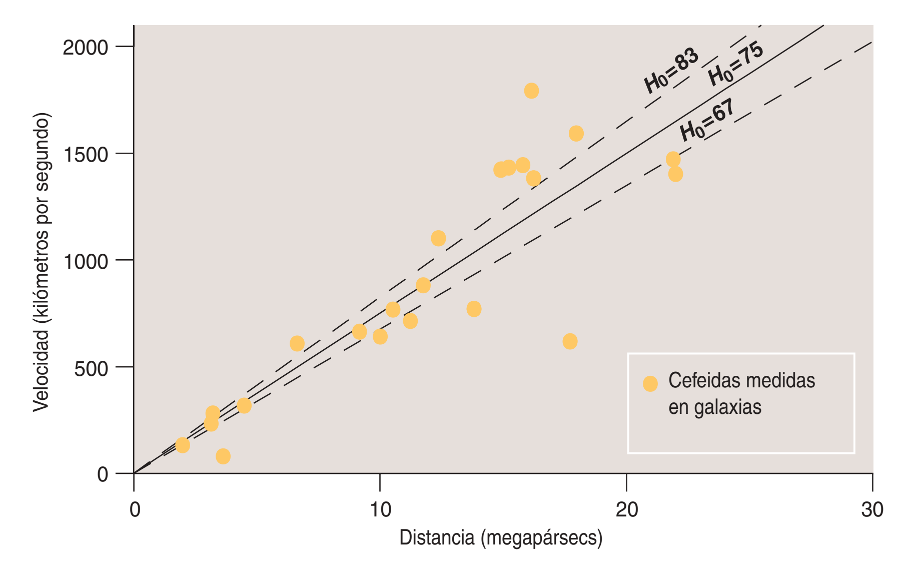


LAS CEFEIDAS son estrellas de una masa que, como poco, triplica la del Sol; han alcanzado un punto inestable en su evolución. Durante la fase cefeida, las atmósferas exteriores de estas estrellas pulsan —cambian de tamaño y de color (*izquierda*) y, por tanto, de brillo o luminosidad— siguiendo un período muy regular, que va de 2 a más de 100 días. (Determina más el brillo de una cefeida su color que su tamaño.) Las estrellas más brillantes tienen períodos mayores, según una relación lineal (*derecha*); gracias a esta relación, se calibra la luminosidad de una estrella a partir de su período. La ley del inverso del cuadrado aplicada a la radiación permite entonces determinar la distancia absoluta de la cefeida. La propia escala de distancias de las cefeidas se calibra indirectamente con las medidas de estas estrellas en la Gran Nube de Magallanes, cuya distancia se determina mediante una combinación de métodos.

tante —o "candelas estándar"— o que guarde relación con alguna cualidad del objeto que no dependa de la distancia, como el período de oscilación, la velocidad de rotación o el color. Las candelas estándar deben entonces calibrarse por separado con una unidad de medida absoluta, para que así sirvan para determinar la distancia verdadera.

El método más preciso de medir distancias se basa en la observación de las variables cefeidas, estrellas cuyas atmósferas pulsan de una manera muy regular, con períodos de entre 2 y más de 100 días. En la primera mitad del siglo XX, Henrietta Leavitt descubrió una relación entre el brillo (o luminosidad) medio intrínseco de una cefeida y su período de pulsación: las estrellas más brillantes tienen períodos más largos. Conociendo su brillo intrínseco, los astrónomos pueden deducir la distancia a una cefeida ya que el brillo aparente de la estrella decrece con el inverso del cuadrado de su distancia. Las cefeidas, además, son estrellas brillantes de por sí; resulta posible observarlas más allá de la Vía Láctea, en otras galaxias. Hubble descubrió galaxias exteriores a la Vía Láctea gracias a sus mediciones de cefeidas. Merced a esas y otras distancias, determinó que el universo se expande.

La clave para observar cefeidas en otras galaxias es un telescopio con suficiente poder de resolución como para distinguirlas de las demás que contribuyen al conjunto luminoso de la galaxia. Aquí es donde el TEH desempeña un papel central. Como orbita por encima de la turbulenta atmósfera de nuestro pla-



2. LAS MEDIDAS DE VELOCIDADES Y DISTANCIAS de galaxias en este diagrama de Hubble, basadas sólo en estrellas variables cefeidas de 22 galaxias, dan una constante de Hubble H_0 de 75 kilómetros por segundo por megapársec (*pendiente de la línea sólida*). Como las cefeidas sólo se pueden medir con precisión hasta distancias de 20 o 30 megapársecs, se combinaron estos resultados con los de otros métodos para determinar un valor más preciso de H_0. (Las líneas de trazos muestran el valor con errores de más o menos un 10 por ciento.)

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

neta, su resolución es unas diez veces mejor que la de los telescopios terrestres. Así, abrió la posibilidad de observar cefeidas en un volumen de espacio extragaláctico mil veces mayor que antes. (Recordemos que el volumen aumenta con el cubo de la distancia lineal.) Con el TEH, cabe medir esas estrellas variables hasta en algunos grandes cúmulos de galaxias cercanos, a unos 30 megapársecs de distancia. Para extender la escala de distancias extragalácticas más allá de esta distancia, se necesitan otros métodos.

Tres de ellos se basan en las propiedades globales de las galaxias espirales y elípticas. Por ejemplo, la *relación de Tully-Fisher* establece que la velocidad rotacional de una galaxia espiral está correlacionada con su luminosidad: las galaxias intrínsecamente brillantes giran más deprisa que las débiles. Esta correlación se ha comprobado en centenares de galaxias. Hay una relación análoga para las galaxias elípticas: el intervalo de las velocidades orbitales de las estrellas de las galaxias más brillantes tiende a ser mayor; o, dicho de otra forma, presentan una mayor dispersión de velocidades. Un tercer método aprovecha que cueste más resolver en estrellas una galaxia cuanto más lejos se halle. Por ejemplo, una imagen de una galaxia próxima podría alojar una media de 10 estrellas por píxel (o elemento de imagen), mientras que una galaxia distante tendría quizá mil. La galaxia cercana parecerá granulosa; su brillo superficial global exhibirá unas fluctuaciones de una magnitud considerable. A la galaxia lejana, en cambio, se la verá más difusa. Cada uno de estos métodos puede aplicarse a galaxias que no se encuentren a más de 150 megapársecs de distancia.

Entre los indicadores de distancias cosmológicas más prometedores se halla el brillo máximo de las supernovas del tipo Ia. Se producen estas explosiones cuando el material de una estrella cae sobre la enana blanca con la que forma un sistema binario. Con esa masa extra, la enana blanca acaba por superar el límite de su estabilidad (el *límite de Chandrasekhar*). El subsiguiente colapso gravitatorio conduce a la combustión explosiva de su carbono. La enana estalla entonces. Radiará brevemente tanto como una galaxia entera. La forma de la *curva de luz* de la supernova (la gráfica de cómo cambia su brillo con el tiempo) indica su luminosidad máxima: las supernovas brillantes tienden a presentar curvas más suaves (de la misma manera que los períodos de las cefeidas brillantes tienen períodos más largos) y la luminosidad relativa de la supernova se puede determinar con bastante precisión. Como las supernovas son tan brillantes, valen para medir H_0 allá donde las velocidades de recesión se acercan a los 30.000 kilómetros por segundo (a distancias de unos 400 megapársecs) y los efectos del movimiento peculiar de las galaxias se reducen a menos de un uno por ciento. (Las velocidades peculiares de las galaxias vienen a ser de entre 200 y 300 kilómetros por segundo.)

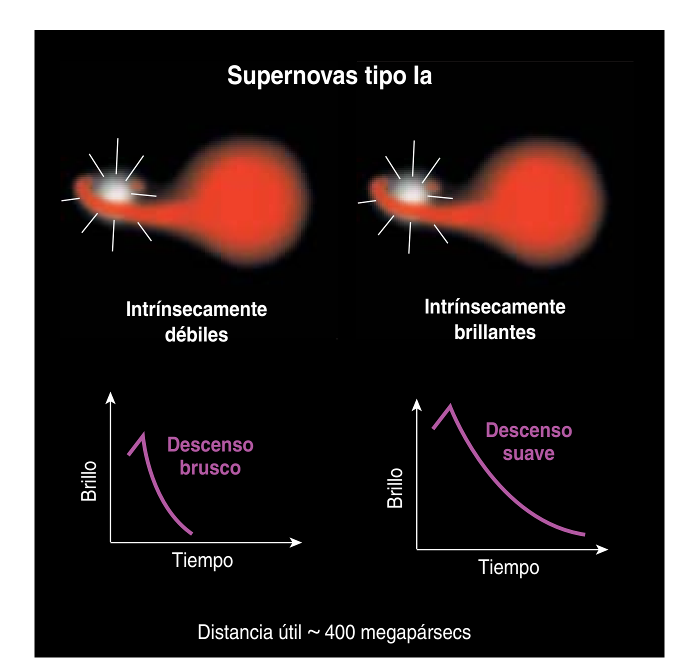


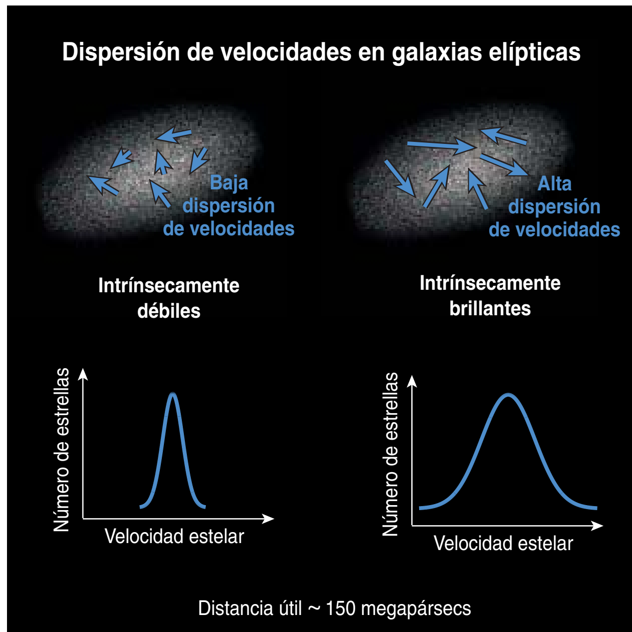
3. LAS SUPERNOVAS DE TIPO Ia, como 1994D (*punto brillante, abajo a la izquierda*), de la galaxia espiral NGC 4526, valen para marcar distancias a partir de la determinación de su brillo relativo. Han desempeñado un papel dual en cosmología. Las que se encuentran a menos de 400 megapársecs se usan para estimar H_0, pero más allá de esas distancias la representación del diagrama de Hubble de sus velocidades y distancias deja de ser lineal. Este alejamiento de la linealidad en el universo remoto revela que el ritmo de expansión del universo se está acelerando, un fenómeno que pocos se esperaban.

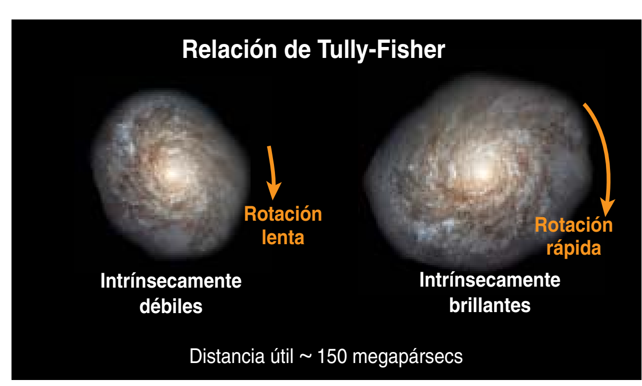
CORTESIA DE HIGH-Z SUPERNOVA SEARCH TEAM Y NASA

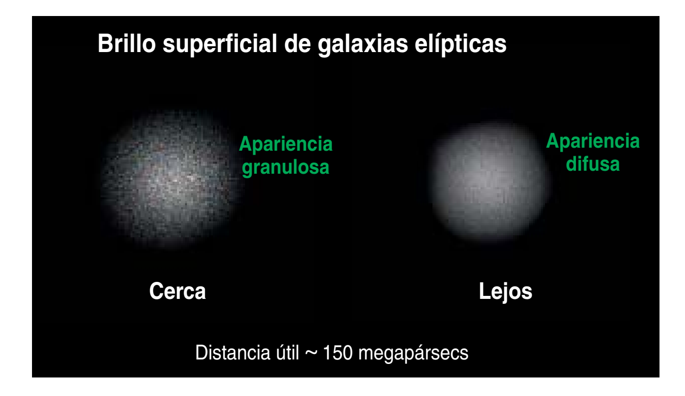
También sirve para evaluar distancias otra clase de explosiones estelares, las supernovas de tipo II, que se producen en estrellas de diversos tamaños, pero siempre de masa muy elevada. Muestran un intervalo de luminosidad más amplio que las supernovas Ia. Aunque no son candelas estándar, la espectroscopía de sus atmósferas en expansión y las medidas fotométricas de su tamaño angular determinan a qué distancia se encuentran, mientras sea inferior —al menos con los medios actuales— a 200 megapársecs.

Con estos indicadores se miden las distancias relativas de las galaxias. Sin embargo, como con cualquier mapa, necesitamos una escala absoluta. La calibración de estos métodos se basa hoy en día en la escala de distancias de las cefeidas —el escalón más bajo de la escala de distancias—; los otros métodos se consideran secundarios. (En principio, las supernovas de tipo II pueden proporcionar medidas de distancia absolutas, pero en nuestro trabajo las calibramos por medio de las cefeidas.) Con una excepción, todos los indicadores de distancia secundarios se calibran directamente midiendo las distancias a las cefeidas de galaxias que muestren una o varias de las propiedades empleadas por el método secundario. La técnica de la dispersión de velocidades en las galaxias elípticas no se puede calibrar directamente con las cefeidas. Ese método se calibró indirectamente mediante las distancias a cefeidas de cúmulos de galaxias donde se encuentren las ga-









4. LOS INDICADORES DE DISTANCIAS SECUNDARIOS se utilizan para medir la constante de Hubble en el universo lejano (hasta 400 megapársecs o 13.000 millones de años luz de distancia). Cada uno de estos cuatro métodos proporciona una manera independiente de medir la distancia relativa de una galaxia. En cada caso, se correlaciona alguna propiedad medible con el brillo intrínseco o la distancia relativa del objeto. Así, las curvas de luz de las supernovas del tipo Ia intrínsecamente brillantes tienen una caída suave (*arriba a la izquierda*), mientras que las estrellas de galaxias elípticas intrínsecamente brillantes exhiben un intervalo de velocidades más amplio (*arriba a la derecha*), las galaxias espirales intrínsecamente brillantes giran más deprisa (*abajo a la izquierda*) y las galaxias elípticas alejadas parecen más difuminadas que las más cercanas (*abajo a la derecha*). Las distancias relativas determinadas con estos métodos se calibran (directa o indirectamente) con la escala de distancias de las cefeidas.

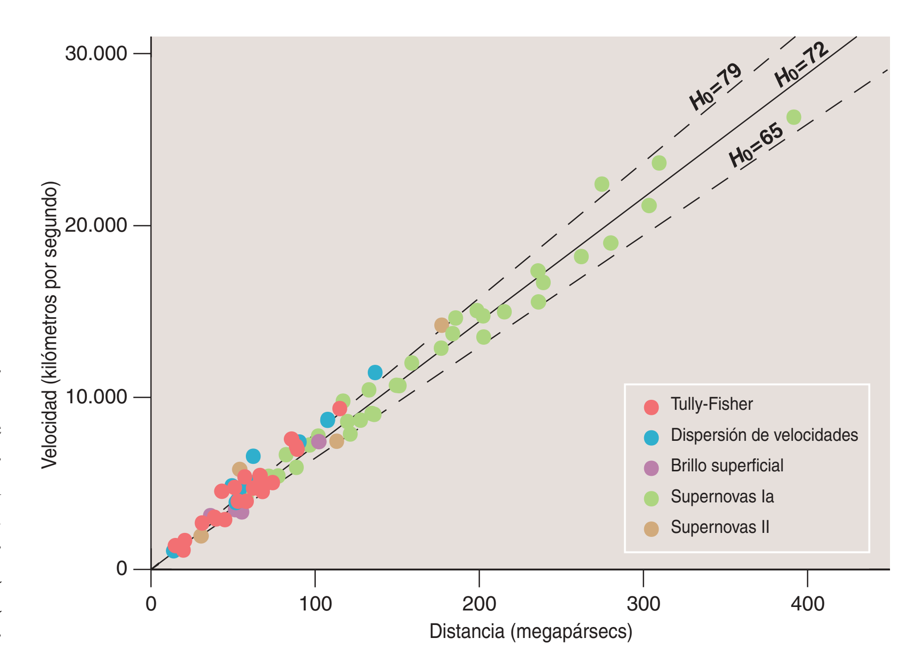
laxias elípticas; ninguno padece de mayor incertidumbre.

$H_0 \approx 72$

Aunque cada uno de los métodos de medida de distancias secundarios proporciona por sí mismo una estimación de H_0, el *Key project* del TEH se concibió de manera que no corriese el riesgo de apoyarse en un solo método: combinó los resultados de diversos planteamientos. A pesar de ello, debe tenerse en cuenta que existe un razonable grado de coincidencia en el valor de H_0 obtenido por los distintos métodos: el de las cefeidas da 75; las supernovas del tipo Ia, 71; la relación de Tully-Fisher, 71; la dispersión de velocidades en galaxias elípticas, 82; las fluctuaciones del brillo superficial, 70; y las supernovas de tipo II, 72. Una media ponderada de estos valores da un resultado para H_0 de 72 ± 8. Esta convergencia se puede apreciar gráficamente (*véanse las figuras 5 y 6*) y es especialmente notable para las galaxias con velocidades de desplazamiento hacia el rojo de más de 5000 kilómetros por segundo (es decir, a más de unos 70 megapársecs de distancia), en las que los efectos de los movimientos peculiares son pequeños, comparados con la corriente de Hubble.

¿Qué significado tiene ese 72? Recordemos que H_0 es el ritmo actual de expansión del universo. Aunque la constante de Hubble constituye el parámetro principal en el cálculo de la edad del universo, la determinación de una edad precisa requiere que sepamos cómo el ritmo de expansión actual difiere del ritmo en el pasado. Si la expansión se ha frenado o acelerado, los cálculos de la edad del

5. EL DIAGRAMA DE HUBBLE de cinco indicadores de distancia secundarios indica un valor medio combinado de la constante H_0 de 72. La integración de este valor de H_0 en la ecuación de Friedmann sugiere que el universo se ha estado expandiendo durante unos 13.000 millones de años.



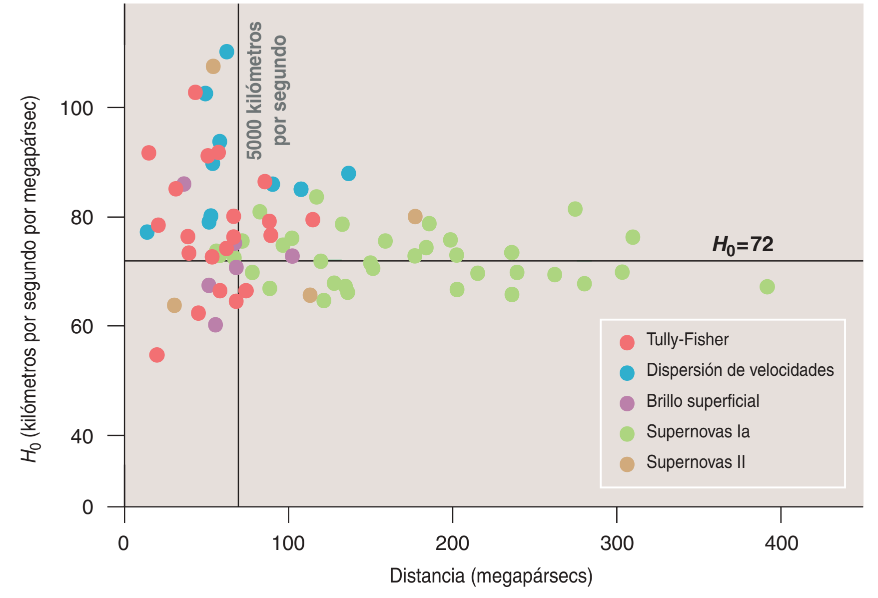
universo lo deben tener en consideración.

Hasta hace poco, se pensaba que la fuerza gravitacional de la materia estaba frenando la expansión del universo. Según este punto de vista, la expansión habría sido más rápida en el pasado, de manera que la edad estimada del universo sería menor que si se hubiera estado expandiendo siempre al mismo ritmo (debido a que un ritmo más rápido habría permitido que el universo alcanzara el "mismo lugar" en menos tiempo). Y esta desaceleración es lo que se esperaba encontrar cuando se mirase más lejos en el espacio y más atrás en el tiempo.

Se comprende que algo falla en esta idea en cuanto se calcula la edad del universo suponiendo que se está frenando. Con una constante de Hubble de 72, un universo en desaceleración sólo tiene 9000 millones de años. El problema es que conocemos estrellas de nuestra galaxia que, por lo menos, existen desde hace 12.000 millones de años. Como las estrellas no pueden ser más viejas que el universo, salta a la vista que algún fallo ha de haber. En el buen acuerdo entre las diversas maneras de estimar las edades de las estrellas viejas se fundan los astrónomos para aceptar que las edades estelares no son erróneas.

La resolución del problema se encuentra en una propiedad recientemente descubierta del propio universo. En 1998, dos grupos de astrónomos que estudiaban supernovas muy lejanas comunicaron un hallazgo notable: las supernovas del tipo Ia más distantes parecen más débiles de lo esperado. Aunque es posible (pero no hay pruebas) que las supernovas fueran más débiles de por sí en el pasado remoto, la explicación más sencilla es que estas explosiones se encuentran realmente más lejos de lo que se hallarían si el universo se estuviera frenando. En otras palabras: las supernovas de tipo Ia dan a entender que la expansión del universo se acelera. Nuevos estudios han corroborado este resultado. Por eso, muchos creen ahora que debe de haber en el universo una fuerza repulsiva hasta ahora desconocida, que actúa contra la gravedad. Se la denomina *energía oscura*.

Hasta cierto punto, la existencia de la energía oscura fue anticipada por Einstein. Incluso antes de que se descubriera la expansión del universo, las ecuaciones de Einstein que describían la evolución del universo contenían un término que él llamó "constante cosmológica" (Λ). Como según los astrónomos de su tiempo el universo no se movía, introdujo el término para *evitar* cualquier ex-

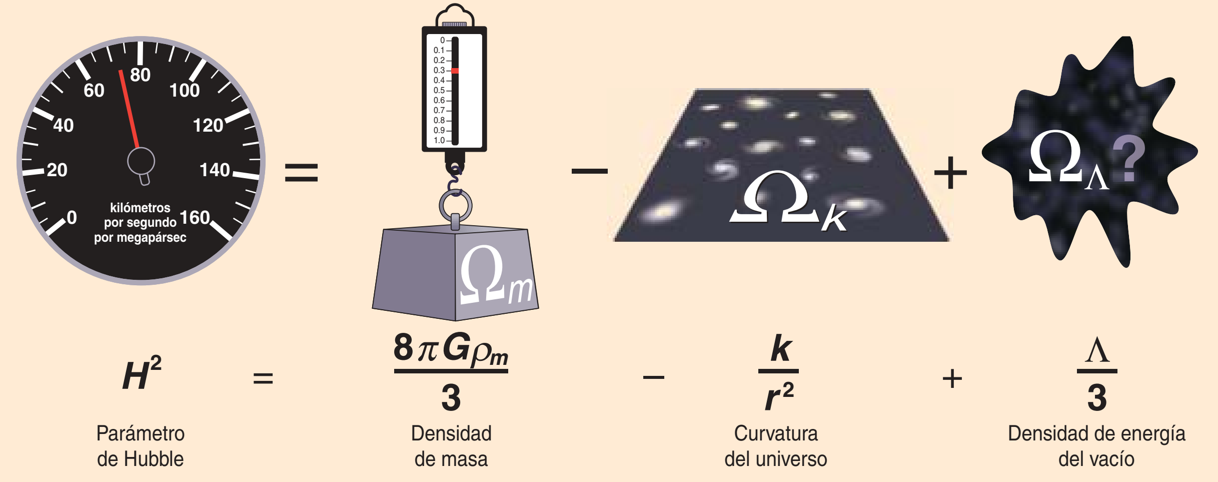


6. EL VALOR DE LA CONSTANTE DE HUBBLE converge hacia 72 a medida que las velocidades de recesión de las galaxias se miden a distancias cada vez mayores mediante indicadores de distancia secundarios. Más allá de una velocidad de recesión de unos 5000 kilómetros por segundo (a una distancia de unos 70 megapársecs), los efectos de los movimientos peculiares de una galaxia (debidos a las interacciones gravitacionales con otras galaxias) se reducen a menos del 5 por ciento de su velocidad total. Estas galaxias alejadas proporcionan una medida más precisa de H_0.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

LA ECUACION DE FRIEDMANN Y LOS PARAMETROS COSMOLOGICOS

A fin de simplificar sus cálculos, Albert Einstein supuso que el universo era a la vez homogéneo (que tenía la misma densidad en todas partes) e isótropo (que todas las direcciones eran indistinguibles). Las observaciones modernas ratifican que estas hipótesis también son muy buenas aproximaciones del universo real. Según la teoría general de la relatividad, la evolución de un universo así se puede describir mediante la ecuación de Friedmann:



$$H^2 = \frac{8\pi G\rho_m}{3} - \frac{k}{r^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Parámetro de Hubble — Densidad de masa — Curvatura del universo — Densidad de energía del vacío

en la que H es el parámetro de Hubble, G es la constante de la gravitación de Newton, ρ_m es la densidad de masa media del universo, k es la curvatura del universo, r es el factor de escala (la distancia relativa de las galaxias en función del tiempo) y Λ es la constante cosmológica (introducida por Einstein). Esta ecuación nos permite determinar tanto la edad como el tamaño del universo, siempre y cuando midamos algunos de los parámetros.

Si dividimos los dos lados de la ecuación por H^2, obtenemos la densidad de masa, $\Omega_m = 8\pi G\rho_m/3H^2$; el término de curvatura, $\Omega_k = -k/r^2H^2$; y la densidad de energía del vacío $\Omega_\Lambda = \Lambda/3H^2$. Esto da la igualdad $\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1$.

Las medidas del fondo cósmico de microondas indican que el universo es plano, $\Omega_k = 0$, de manera que el término de curvatura desaparece y la evolución del universo queda descrita sólo por Ω_m y Ω_Λ. Las observaciones recientes sugieren que el universo no está dominado por la materia, sino más bien por la energía del vacío, que ejerce una presión negativa que acelera su expansión.

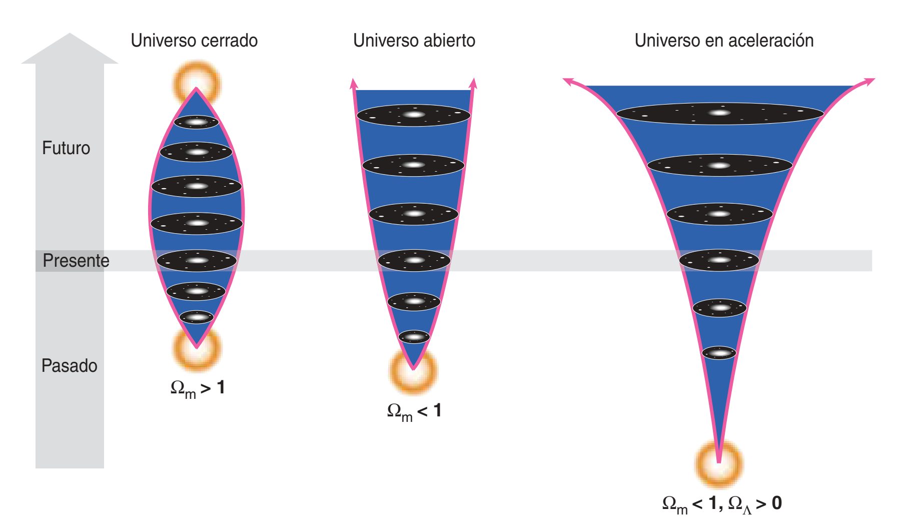
BARBARA AULICINO/*American Scientist*

pansión o contracción debidas a los efectos de la gravedad. (La constante cosmológica, Λ, aparece también en la ecuación de Friedmann.) Cuando Hubble descubrió la expansión, parece que Einstein dijo que la constante cosmológica había sido su mayor equivocación: ya no parecía necesaria; había perdido, además, la oportunidad de predecir ese nuevo hallazgo.

Hasta hace unos cuantos años, se solía igualar Λ a cero en la ecuación de Friedmann. Sin embargo, el descubrimiento de que el universo se está acelerando apunta a que, después de todo, ese término quizá sea necesario. La constante cosmológica podría representar la energía oscura o la densidad de energía del vacío (Ω_Λ). Ω_Λ tiene algunas propiedades muy curiosas. Como la materia, curva el espacio y contribuye así a la geometría global del universo, pero al contrario que aquélla ejerce una "presión negativa" que provoca la expansión acelerada que observamos.

¿Cómo calculamos la edad de expansión del universo a la luz de estos resultados? El uso de la ecuación de Friedmann no sólo exige una precisa estimación de H_0, sino también de los parámetros de densidad, Ω_m y Ω_Λ, y el término de curvatura Ω_k. La teoría inflacionaria (un modelo cosmológico muy exitoso, según el cual hubo una fase de expansión rapidísma muy al inicio del universo) y las observaciones de la radiación cósmica de fondo indican que el universo es "plano", es decir, que $\Omega_k = 0$; el término de curvatura desaparece. En un universo plano (por definición) $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$.

La densidad de masa del universo, Ω_m, debe determinarse mediante la observación y el experimento. No es fácil. Las velocidades de rotación de las galaxias y la dinámica de los cúmulos de galaxias sugieren que la materia visible del universo, la materia de que están hechas las estrellas y las nebulosas brillantes, constituye sólo una fracción de su masa total. El resto parece corresponder a alguna forma de material invisible, o *materia oscura*, que interacciona gravitatoriamente con esos cuerpos luminosos y altera así la dinámica de las galaxias y de los cúmulos de galaxias. Las estrellas y las nebulosas brillantes parecen comprender tan sólo un 1 por ciento de la materia y la energía del universo. Cuerpos no luminosos (parte de la materia oscura), bien semejantes a planetas, bien gases intergalácticos templados, podrían sumar otro cuatro por ciento. Toda esta materia normal (formada por bariones, es decir, sobre todo por protones y neutrones) no totaliza más del 5 por ciento de la densidad crítica. Parece que otro 25 por ciento (el resto de la materia oscura) se trata de formas exóticas de materia no bariónica; se cree que está formada por partículas aún no conocidas que interaccionan con la materia bariónica por medio, casi exclusivamente, de



7. EL CURSO DE LA EVOLUCION del universo en expansión depende de la cantidad total de masa que contiene. El parámetro Ω_m es la razón de la densidad de masa actual en el universo con relación a su valor crítico, que establece la divisoria entre un universo que se expande indefinidamente y uno que finalmente se contrae de nuevo. El valor crítico se define como $\Omega_m = 1$ y corresponde a que haya suficiente materia en el universo para evitar su eterna expansión o su derrumbe final sobre sí mismo. En un universo "cerrado", con $\Omega_m > 1$, el tirón gravitacional de la materia hace que el universo finalmente colapse y sufra una "gran implosión". En un universo abierto, con $\Omega_m < 1$, no hay suficiente materia como para frenar gravitacionalmente la expansión, de manera que ésta continuaría para siempre. Se ha determinado que vivimos en un universo con $\Omega_m < 1$, pero una energía oscura (o del vacío) ($\Omega_\Lambda > 0$) parece que está acelerando la expansión. Cada uno de estos modelos implica también una edad distinta del universo, basándose en su actual ritmo de expansión. (Adaptada de una ilustración de la NASA.)

TOM DUNNE/*American Scientist*

la gravedad. Esto lleva la densidad total de masa del universo al 30 por ciento (o sea, $\Omega_m = 0{,}3$). De manera que, en un universo plano, la densidad de energía del vacío debería rondar el 70 por ciento ($\Omega_\Lambda = 0{,}7$) de la densidad total de masa y energía. Integrando la ecuación de Friedmann con estos valores de las densidades y un valor de H_0 de 72, deducimos una edad del universo de unos 13.000 ± 1000 millones de años, un valor que concuerda con las edades de las estrellas más viejas.

¿Qué toca ahora?

Hace algunos decenios, el universo parecía un lugar mucho más sencillo. No había en él, se creía, sino materia ordinaria, y para describir su expansión bastaba con la constante de Hubble y la densidad de materia. Hoy hay pruebas convincentes de que la materia, bariónica y no bariónica, abarca alrededor de un tercio de la densidad total de masa y energía, y de que el universo se está acelerando, señal de la existencia de una misteriosa energía oscura a la que se deberían los dos tercios restantes. Hasta ahora, la teoría no puede proporcionar una explicación de la energía oscura. Peor aún: cálculos basados en la física de partículas discrepan de las observaciones (y ya era así incluso cuando se atribuía un valor nulo a la constante cosmológica). Las observaciones astronómicas, pues, anuncian una física radicalmente nueva para un universo donde la naturaleza del 95 por ciento de la masa y la energía total es desconocida.

Es un tiempo apasionante para la cosmología. Quizás han pasado los días del astrónomo solitario sentado en un cubículo frente a un foco primario. Pero un conjunto de observaciones y experimentos planificados están conduciéndonos a una nueva era de observaciones con una precisión sin precedentes. A finales del decenio llegarán mejoras significativas en la medición de la constante de Hubble con el lanzamiento de nuevos satélites interferométricos: la Misión Interferométrica Espacial o SIM, de la NASA, y GAIA, un proyecto de la Agencia Europea del Espacio. Estos instrumentos mejorarán entre cien y mil veces la precisión de las determinaciones trigonométricas de las distancias paralácticas a las cefeidas de nuestra galaxia, que sirven para calibrar las cefeidas extragalácticas. La calibración de las cefeidas es la mayor de las incertidumbres que quedó en las medidas de H_0 del *Key project*.

Muchos experimentos buscan unas partículas que interaccionan débilmente de las que se supone que podrían constituir la materia oscura. Grandes equipos miden con meticulosidad la aceleración del universo y se piensa en construir un satélite dedicado, principalmente, a esa tarea. En las pequeñas fluctuaciones de la radiación de fondo cósmica de microondas hay información codificada acerca de todos estos parámetros cosmológicos. Las mediciones de esa radiación por el satélite WMAP, combinadas con otros análisis, han arrojado una H_0 muy similar a la del *Key Project:* el valor central, dentro del margen de error experimental, es 71.

La autora

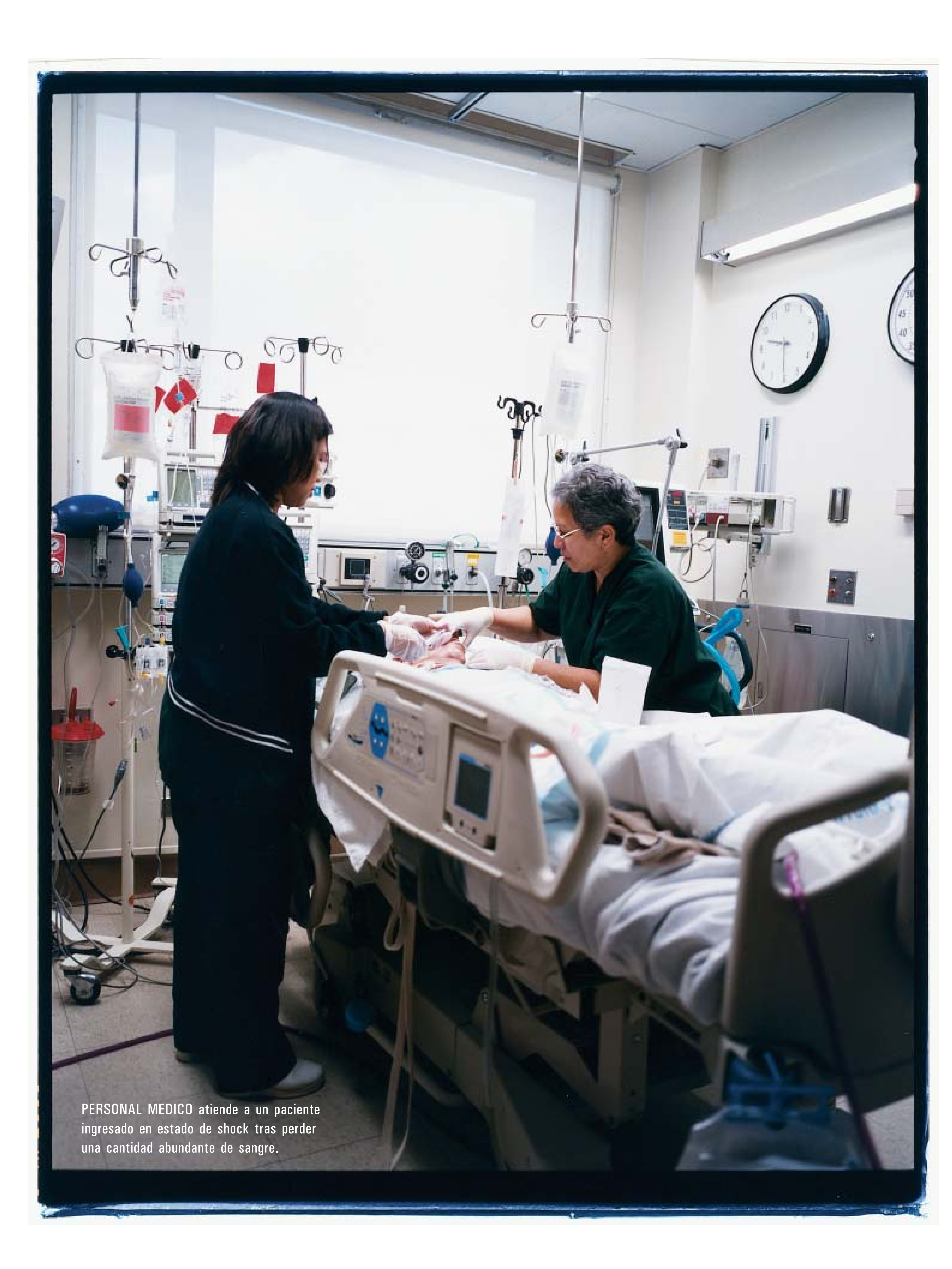
Wendy Freedman es astrónoma de los Observatorios Carnegie, en Pasadena, California. Es miembro de la Academia de Ciencias.

Bibliografía complementaria

THE MEASURE OF COSMOLOGICAL PARAMETERS. W. L. Freedman en *Proceedings of the Inaugural Conference of the Michigan Center for Theoretical Physics*; dirigido por J. J. Duff y J. T. Liu. World Scientific; Singapur, 2003.

FIRST YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (*WMAP*) OBSERVATIONS: DETERMINATION OF COSMOLOGICAL CONSTANTS. D. N. Spergel *et al.* en *Astrophysical Journal Supplement Series* 148, pág. 175; 2003.

MEASURING AND UNDERSTANDING THE UNIVERSE. W. L. Freedman and Michael Turner en *Reviews of Modern Physics* 75, 1433-1447; 2003.



PERSONAL MEDICO atiende a un paciente ingresado en estado de shock tras perder una cantidad abundante de sangre.

El shock y sus causas

La investigación reciente abre nuevas vías para el tratamiento de este descenso de la presión arterial que a menudo resulta letal

Donald W. Landry y Juan A. Oliver

Ojos vidriosos y la mirada perdida. Cualquiera que sea su causa —un ataque cardíaco, un accidente de tráfico, una infección bacteriana grave—, el shock preludia a menudo la muerte del sujeto catatónico. Sólo en EE.UU., cada año medio millón de personas caen en ese estado de shock súbito. La mitad de ellos mueren. Para varios millones más, constituye la última etapa de una enfermedad terminal. La raíz del shock se encuentra en una bajada de la presión arterial, que da lugar a una insuficiencia circulatoria, es decir, a una reducción del volumen de sangre que llega a los tejidos. Esta alteración se torna fatal cuando la anoxia daña de forma irreversible el cerebro y otros órganos vitales. Pueden tomarse varias medidas para conjurarlo antes de que sea demasiado tarde; pero no es infrecuente que fallen, en particular si el shock se debe a una infección incontrolada.

Ante tales efectos devastadores y su prevalencia, los expertos se afanan por desarrollar tratamientos más eficaces. Pese a las esperanzas iniciales, varias de las moléculas candidatas a convertirse en fármacos han fracasado en los últimos años. Sin embargo, un hallazgo reciente, fortuito, nos ha llevado a una terapia prometedora. Si bien el medicamento en cuestión no evita el shock, sí permite aliviar a millares de víctimas de éste. Con suerte, nuestro planteamiento y el de otros podrían augurar una nueva etapa terapéutica.

Presión arterial

No podemos ahondar en la naturaleza del shock sin antes comprender la fisiología del sistema circulatorio. La vida primitiva en los antiguos mares de la Tierra se apoyaba en un principio físico sencillo para obtener oxígeno y nutrientes y liberarse del dióxido de carbono y materiales de desecho: la difusión. En este proceso, las moléculas viajan, de forma natural, desde zonas de concentración elevada hacia otras de concentración menor. Pero este fenómeno de transporte resultaba eficiente sólo cuando se trataba de recorrer distancias milimétricas. Los organismos de cierta talla necesitaban un mecanismo más potente. La naturaleza solucionó el problema con el desarrollo del sistema circulatorio: la sangre se encargaría de portar las biomoléculas hasta puntos alejados. Para la mayoría de los organismos, el corazón constituye la fuerza impulsora de este flujo, que, a su vez, distribuye gases y nutrientes esenciales por todo el cuerpo.

La sangre rica en oxígeno entra en contacto con los tejidos a través de una red de vasos que culminan en los capilares, vasos diminutos y muy permeables. Las arterias llevan la sangre desde el corazón a las arteriolas, de menor luz, que a su vez la conducen hasta los capilares. Para que la sangre circule, el corazón debe generar una fuerza que venza la resistencia que encuentra a su paso, conforme se van estrechando los vasos. La presión arterial mide la fuerza que la sangre ejerce contra los vasos sanguíneos cuando el corazón se contrae (presión sistólica o máxima) y se relaja (presión diastólica o mínima).

El corazón del hombre bombea alrededor de cinco litros de sangre a través de unos 15 kilómetros de vasos sanguíneos unas 1000 veces al día. Una interrupción del flujo de sangre durante seis segundos escasos puede dejar inconsciente a un individuo. Basta un descenso moderado de la presión arterial para privar de oxígeno al cerebro y dejar a un paciente lívido, si no se desmaya. En cuestión de minutos, otros órganos empiezan a resentirse. Se entra entonces en estado de shock. Si éste persiste y los órganos quedan irreversiblemente dañados, llega la muerte.

La clasificación de los distintos tipos de shock responde a las causas que los desencadenan. Son diversas. Uno de los más frecuentes, el shock hipovolé-

RICH PRESS

mico, se produce por una caída brusca del volumen sanguíneo. Ello ocurre, por ejemplo, cuando un traumatismo o una úlcera de estómago provoca una fuerte hemorragia o cuando una diarrea grave drena los líquidos del organismo. El corazón bombea demasiada poca sangre en cada latido y, aunque intenta compensar la bajada de presión mediante un incremento del ritmo, no lo consigue: la presión arterial cae y los tejidos quedan sin alimento. Cuando se trata de un shock hipovolémico, del que se producen millares cada año, los médicos se esfuerzan por parar la hemorragia o la pérdida de otros fluidos mediante la transfusión de sangre, la infusión de una solución salina o ambas medidas a la vez, para compensar así el volumen del líquido que el organismo ha perdido. Los investigadores buscan nuevas formas para detener la hemorragia: aplicar una sustancia que aumente la coagulación o utilizar sucedáneos de la sangre si falta ésta en cantidad suficiente.

El shock cardiogénico se presenta cuando el corazón deja de bombear adecuadamente. Si un trombo bloquea una arteria coronaria e impide que el oxígeno llegue al músculo cardíaco, se produce un infarto: parte del miocardio queda privado de oxígeno y necrosa, dejando al corazón incapaz de funcionar con normalidad. También, una arritmia —un latido demasiado rápido, demasiado lento o no sincronizado— o el fallo de una válvula del corazón, que no se cierra bien, desencadenan un shock cardiogénico. En los aproximadamente 280.000 casos de shock cardiogénico que ocurren cada año en los EE.UU., los médicos a menudo recurren a alguno de estos tratamientos: administrar medicamentos para aumentar la capacidad contráctil del miocardio, reemplazar una válvula (por una válvula mecánica o una procedente de cerdo) o implantar un desfibrilador, un mecanismo que emite una descarga eléctrica al corazón, manteniendo así el bombeo coherente del músculo cardíaco. Si todo eso falla, se opta por el trasplante de corazón.

El tercer tipo de shock, el más habitual, es el vasodilatador. Se produce cuando un shock cardiogénico o hipovolémico se prolonga varios días. En esos casos, el shock podría persistir, aun cuando se haya estabilizado el corazón o se hubiera transfundido sangre. Pero la causa más frecuente de este tipo de shock es la sepsis, una infección grave en la que hongos o bacterias irrumpen en la sangre, desencadenando una respuesta inflamatoria. Los leucocitos y otros agentes del sistema inmunitario alteran la función de los tejidos en un combate desesperado contra la infección. La sepsis afecta cada año a unas 500.000 personas en los EE.UU.; alrededor de la mitad desarrollan un shock séptico y 125.000 mueren por su causa. El corazón no es aquí el culpable del shock, pues bombea un flujo elevado de sangre (la piel del paciente permanece caliente al tacto). La raíz del problema se encuentra lejos, en las arteriolas.

Desde hace tiempo, los expertos venían sospechando que una mayor comprensión de la disfunción de las arteriolas podría ayudar a mejorar el tratamiento del shock vasodilatador. En ese contexto, los esfuerzos empeñados en desentrañar el origen de las alteraciones de las arteriolas nos recompensaron, hace ahora poco más de seis años, con un descubrimiento inesperado.

El comportamiento anómalo de las arteriolas arranca de muy atrás; mucho antes de que se asiente el shock. Al caer la presión arterial, lo primero que hace el organismo es intentar detener el shock mediante una respuesta compensadora, que se centra en las arteriolas. Estos tubos están rodeados por miocitos que se contraen o relajan, variando así el diámetro del lumen. En condiciones normales, la coordinación de las arteriolas resulta harto compleja; intervienen numerosos compuestos: noradrenalina, vasopresina, angiotensina II, dopamina y óxido nítrico, entre otros. Cuando la presión arterial cae, algunos de estos factores entran en juego: la noradrenalina y la angiotensina II, que contraen los músculos de la arteriola, se segregan en el torrente sanguíneo; al propio tiempo, el organismo detiene la secreción del péptido natriurético atrial, una proteína que provoca la relajación de los músculos de las arteriolas y, con ello, la dilatación de éstas. Si tales procesos tienen éxito, las arteriolas de la piel y de ciertos músculos no esenciales se contraen, de forma que la sangre que llega encuentra mayor resistencia y, por tanto, se desvía hacia órganos vitales como el cerebro. Para visualizarlo, imaginemos una manguera con una bifurcación: si uno de los brazos se contrae, presión y flujo aumentan en el otro. Eso es precisamente lo que sucede en las arteriolas.

Caída de la resistencia

Pero si, por alguna razón, determinadas arteriolas dejan de contraerse, la sangre no encuentra la resistencia necesaria para dirigirse y llegar hasta las regiones vitales. Aunque parezca extraño, los pacientes que sufren un shock vasodilatador tienen niveles altos de noradrenalina y angiotensina II, lo que da a entender que el problema no reside en la ausencia de señales de constricción. La experiencia clínica apoya también esta hipótesis: los pacientes que reciben estos dos compuestos, apenas mejoran. Este resultado, un tanto enigmático, llevó hace tiempo a muchos expertos a la conclusión de que algo malo ocurría

Resumen/Tratamiento del shock

- Cada año, unas 500.000 personas en los EE.UU. entran en estado de shock por causas muy diversas, entre ellas la sepsis, una infección bacteriana masiva. Para la mitad de estos pacientes, el shock resulta letal.
- La búsqueda de tratamientos eficaces ha resultado harto difícil. Varias líneas de investigación y moléculas candidatas a convertirse en fármacos han fracasado.
- Un hallazgo casual nos ha conducido a la vasopresina. Tradicionalmente utilizada para prevenir hemorragias en el esófago, esta hormona se ha mostrado muy eficaz en el tratamiento del shock.

TIPOS DE SHOCK

En síntesis, el shock tiene su origen en un peligroso descenso de la presión arterial. Cuando la presión baja persiste más allá de breves minutos, la sangre deja de nutrir los órganos vitales y éstos no cumplen su función. La clasificación de los distintos tipos de shocks responde a las causas que los producen.

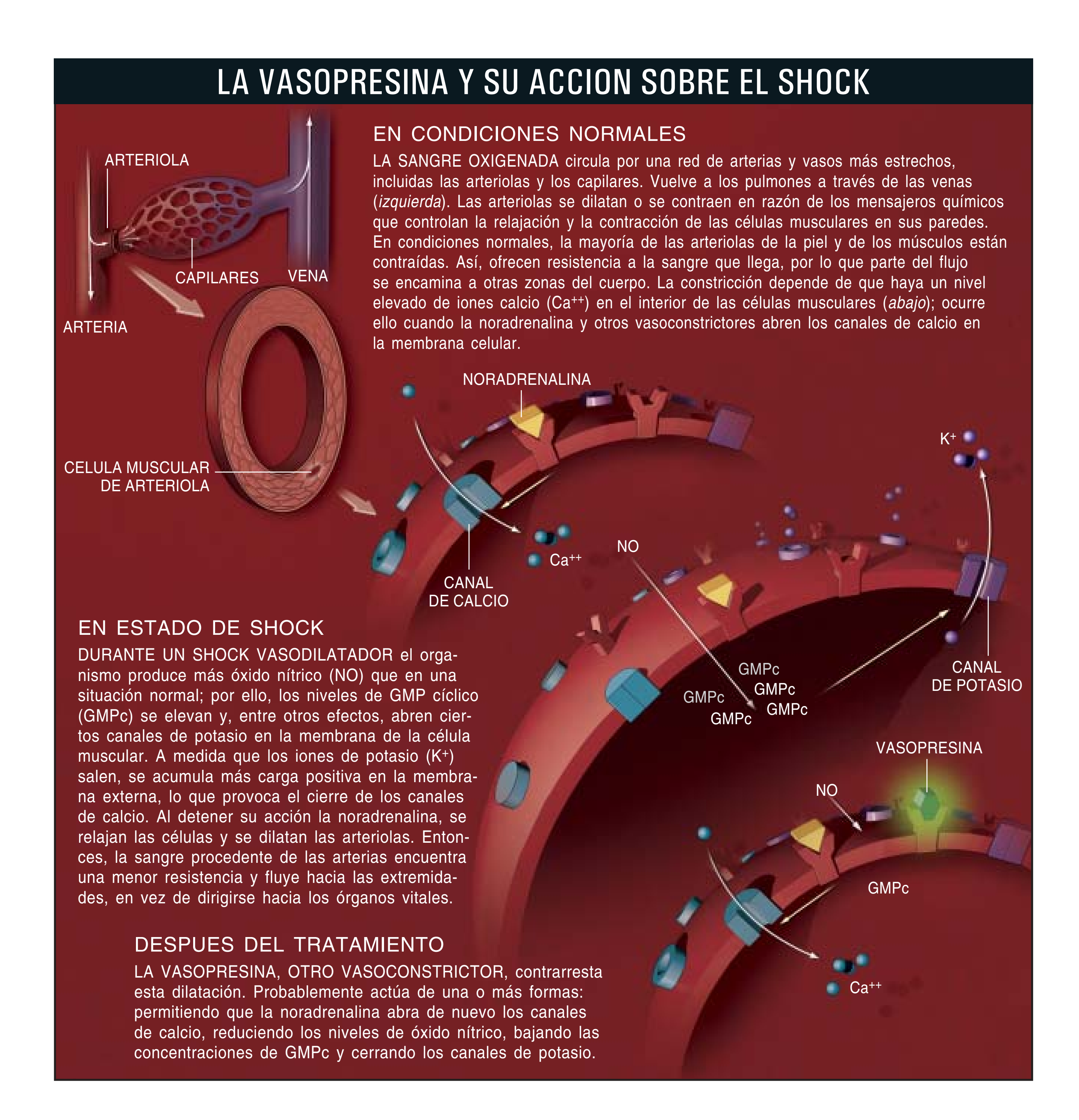
TIPO	CAUSAS	FUNCION CARDIACA	FUNCION ARTERIOLAR	TRATAMIENTOS
1 HIPOVOLEMICO. Se produce a raíz de una hemorragia intensa o una pérdida de líquidos	Traumatismo (un disparo o un accidente de tráfico); úlcera hemorrágica de estómago; diarrea grave	Funciona normalmente pero no dispone de sangre suficiente para bombear: una media de sólo tres litros por minuto en vez de los cinco que se necesitan	Reguladores clave de la distribución de la sangre, las arteriolas se contraen en brazos y piernas, lo que hace que las extremidades estén frías y húmedas. Desvían así la sangre hacia órganos críticos	Detener la hemorragia; administrar líquidos, como sangre y soluciones salinas; utilizar sucedáneos de la sangre. Están en estudio nuevos factores de coagulación
2 CARDIOGENICO. Encuentra su origen en una disfunción cardiaca	Infarto (que daña el miocardio); lesión de una válvula cardíaca (que produce una obstrucción o un derrame); arritmia (el corazón late con rapidez o lentitud excesivas)	No puede bombear normalmente, pese a disponer de sangre suficiente: sólo bombea unos tres litros	Las arteriolas se contraen en brazos y piernas, de nuevo en un esfuerzo para redirigir la sangre hacia órganos críticos	Administrar fármacos que ayuden al miocardio a funcionar más eficazmente; reemplazar la válvula alterada; implantar un desfibrilador; en casos graves, recurrir al trasplante de corazón
3 VASODILATADOR. Se presenta cuando fracasa la contracción regular de las arteriolas	Prolongación de un shock hipovolémico o cardiogénico (en ocasiones el shock persiste incluso cuando el problema primario se haya resuelto); sepsis (desde una infección bacteriana hasta una micosis)	Funciona adecuadamente y el sistema circulatorio dispone de sangre suficiente, no así las arteriolas	Dilatadas en brazos y piernas (que se mantienen calientes al tacto), las arteriolas impiden que la sangre se redirija hacia órganos críticos como el cerebro	Junto con algunos de los tratamientos mencionados arriba: administrar esteroides para rebajar la inflamación; administrar vasopresina

en las células musculares de las arteriolas, pues los miocitos no respondían a sus señales habituales.

A mediados de los años ochenta del siglo pasado, sin embargo, se descubrió que la responsabilidad de la disfunción no recaía tanto en las células musculares cuanto en la acción de cierto agente dilatador. El más prominente de cuantos operan en nuestro organismo es el óxido nítrico, molécula sencilla aunque de efectos muy diversos [*véase* "Funciones biológicas del óxido nítrico", por Solomon H. Snyder y David S. Bredt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1992]. Dichos hallazgos dejaron claro que las infecciones que causan sepsis —neumonía y meningitis, entre otros— determinan también que las células aumenten la síntesis de óxido nítrico. Esta noticia se recibió con entusiasmo. Se ideó un ensayo clínico para someter a prueba un inhibidor del óxido nítrico. Se esperaba que, una vez el dilatador hubiera desaparecido de la escena, los constrictores (noradrenalina y angiotensina II) conseguirían realizar su función. El nuevo tratamiento provocó una auténtica tragedia. Hubo más bajas de las esperadas y se multiplicaron las complicaciones. El óxido nítrico desempeñaba en el organismo funciones tan diversas y desconocidas, que su inhibición desencadenó problemas graves e imprevistos.

Así las cosas, en 1992 descubrimos una vía alternativa para contraer las arteriolas durante un episodio de shock vasodilatador. Todo empezó en una sesión de reflexión conjunta sobre el funcionamiento de la membrana celular. En toda membrana celular existe una diferencia de potencial eléctrico: la carga en la pared interior de la membrana es distinta de la del exterior. Ello se debe, sobre todo, a que los iones potasio dotados de carga positiva residen en el interior celular, junto con todos los tipos de iones dotados de carga negativa, si bien tienden a escapar hacia el exterior, determinando con ello que la parte externa de la membrana adquiera mayor carga positiva que la interior de la misma [*véase* "La técnica del pinzamiento de membrana", por Erwin Neher y Bert Sakmann; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1992].

Las células musculares de las arteriolas utilizan esta diferencia de potencial eléctrico para regular la entrada de iones calcio a través de canales de calcio, que intervienen en la constricción. Si en el exterior de la membrana se acumula más carga negativa que en el interior, los canales de calcio se abren en respuesta a la noradrenalina o angiotensina II; el calcio se precipita hacia el interior de la célula. Esta se contrae entonces. Si, por el contrario, el exterior de la membrana adquiere más carga positiva que el interior, se cierran los canales de calcio, pese a las exigencias de las hormonas vasoconstrictoras. A medida que los niveles de calcio en el interior de la célula disminuyen, la célula muscular se dilata. Por consiguiente, y en punto a la constric-



ción, la diferencia de potencial eléctrico determina la respuesta de los canales de calcio a las hormonas.

El comportamiento de los músculos de las arteriolas viene, pues, pautado por los canales transportadores de calcio. Pero el flujo de iones calcio depende de los canales de potasio para controlar adecuadamente la polarización de la membrana. Dichos canales están, a su vez, regulados por diversos compuestos, entre ellos el trifosfato de adenosina (ATP), una forma de energía celular generada en el metabolismo aeróbico de los nutrientes. Cuando los niveles de ATP disminuyen, se abren ciertos canales de potasio para dar paso al flujo de potasio hacia el exterior de la célula. Así, en la membrana externa se acumula una carga positiva extra, los canales de calcio se cierran y la célula se relaja.

Nos propusimos averiguar si los niveles bajos de oxígeno que se daban en el shock reducirían los niveles de ATP, causando la relajación de las células musculares y la consiguiente bajada de la presión arterial. Con ese objetivo, administramos glibenclamida, un bloqueante de la actividad de los canales de potasio sensibles al ATP. En efecto, se elevó la presión arterial. Este mecanismo explicaba por qué la administración de noradrenalina o angiotensina II fracasaba a la hora de aumentar la constricción: tales compuestos resultan ineficaces si los canales de potasio se encuentran abiertos.

Sin embargo, a imagen de lo descrito antes a propósito del inhibidor del óxido nítrico, la glibenclamida complicaba la situación. Su efecto fue de corta duración; el fármaco provocaba un descenso del nivel de azúcar en sangre cuando se administraron las dosis elevadas necesarias para revertir el shock. (A niveles más bajos, la glibenclamida se usa para tratar la diabetes, puesto que aumenta la actividad del páncreas en la liberación de insulina.) Fueron tiempos de frustración. Sabíamos de la importancia de los canales de potasio regulados por el ATP, de la relevancia del óxido nítrico. Pero no acertábamos a regularlos sin dañar otras zonas.

Un enfoque nuevo

Hasta que en 1997 nuestro trabajo dio un giro a raíz de un hallazgo fortuito. Asistíamos a un paciente que sufría una hemorragia esofágica, quien más tarde desarrolló una infección grave. Cuando ingresó, se le administró vasopresina para contraer los vasos del esófago y detener así la hemorragia. Se conocía bien la eficacia de esa hormona en la constricción de las arteriolas: actuaba en todo el organismo cuando la hipófisis la liberaba en respuesta a una presión arterial baja. Pero los estudios clínicos habían demostrado ya que, cuando se aplicaba en terapia, sólo resultaba eficaz en los vasos del esófago. Por tanto, no esperábamos ningún efecto sobre la presión arterial de nuestro paciente. Ante nuestra sorpresa, cuando retirábamos la vasopresina descendía la presión arterial del enfermo, pero al volver a administrarla, la presión arterial subió. Tal vez, pensamos, la infección lo habría hecho más sensible a la hormona.

¿Era pura carambola o había algo detrás? Para averiguarlo, necesitábamos un paciente con shock séptico y actuar con cautela en la dosis, guiados por el viejo principio deontológico: *primum non nocere* ("en primer lugar, no hacer daño"). Cuando se presentó la ocasión, le administramos al paciente en estado de shock séptico una décima parte de la cantidad que habíamos aplicado al enfermo con hemorragia esofágica, esperando ver sus efectos a medida que incrementábamos la dosis poco a poco. Ante nuestra sorpresa, su presión arterial se elevó drásticamente. La investigación ulterior reveló que los niveles de vasopresina en este y otros pacientes de shock séptico eran muy bajos, contra lo que parecía lógico, a saber, que el organismo produciría vasopresina para intentar remontar la presión arterial.

Nos inquietaba, de entrada, por qué los pacientes con shock vasodilatador sufrían tal deficiencia en vasopresina. En trabajos posteriores demostramos que, en el comienzo del shock —no importaba cuál fuera el desencadenante de éste—, los niveles de vasopresina se elevaban con desmesura. Pero al cabo de unas horas, la vasopresina caía. Ocurría que las reservas se liberaban en el comienzo del shock; la hormona se degradaba en el torrente circulatorio y los niveles de vasopresina tardaban en restablecerse. Reparamos entonces con sendos artículos, que habíamos dejado de lado porque todo el mundo habría concluido que la vasopresina no elevaba la presión arterial; en ellos se afirmaba que la vasopresina reducía los efectos dilatadores del óxido nítrico en las arteriolas y bloqueaba los canales de potasio sensibles al ATP, permitiendo la apertura de los canales de calcio y la contracción de la célula.

Desde esos primeros hallazgos, se ha examinado la vasopresina en 10 estudios, acometidos en diferentes lugares del planeta. Se ha comprobado que restaura la presión arterial de forma fiable, sin efectos secundarios significativos. Desde entonces, la restauración de la presión arterial ha salvado a muchos otros enfermos de la guadaña del shock. Hoy, son muchos los hospitales que recurren a la vasopresina. Se ha puesto en marcha una prueba multicéntrica con pacientes sépticos para determinar, con mayor grado de certeza, si el restablecimiento de la presión arterial logrará menguar los síntomas y muertes relacionados con el shock. Por fortuna, la síntesis de vasopresina no está patentada, lo que significa que su producción no requiere costes elevados.

La vasopresina no constituye la única línea de investigación para afrontar el shock. En años recientes, se han identificado componentes de la cascada inflamatoria desencadenada por la sepsis, que desemboca en shock. Se trabaja en la síntesis de anticuerpos —como el INNO 202— y otros compuestos que bloquean algunos de tales elementos de la respuesta inflamatoria. También se estudia el papel de los esteroides en el freno de dicha reacción en determinados pacientes. Se espera que estas líneas de investigación den lugar a tratamientos eficaces contra la sepsis y el shock.

Ver cómo un hallazgo casual servía para trenzar los cabos sueltos de los mecanismos celulares y moleculares de la constricción, la dilatación y el shock ha constituido para los autores una experiencia apasionante. Pero contemplar cómo todo este conocimiento se traducía rápidamente a la práctica clínica y en tantos lugares ha sido aún más gratificante.

Los autores

Donald W. Landry y **Juan A. Oliver** enseñan en la facultad de medicina de la Universidad de Columbia. Doctorado en química orgánica por la Universidad de Harvard y experto en síntesis enzimática artificial, Landry dirige las áreas de nefrología y terapéutica experimental. De origen español, Oliver se doctoró en medicina por la Universidad de Barcelona, en su Cataluña natal. Tras completar su investigación posdoctoral en Harvard, entró en el claustro docente de la Universidad neoyorquina de Columbia.

Bibliografía complementaria

VASOPRESSIN DEFICIENCY CONTRIBUTES TO THE VASODILATION OF SEPTIC SHOCK. Donald W. Landry et al. en *Circulation*, vol. 95, n.º 5, págs. 1122-1125; 4 de marzo, 1997.

THE PATHOGENESIS OF VASODILATORY SHOCK. Donald W. Landry y Juan A. Oliver en *New England Journal of Medicine*, vol. 345, n.º 8, págs 588-595; 23 de agosto, 2001.

Los primeros nanochips

El constante avance técnico hacia la miniaturización se interna ya en el orden de los nanómetros

G. Dan Hutcheson

Aunque para el común de las gentes tiene resonancias de fantasía científica, la llegada de la nanotecnología al dominio de los circuitos electrónicos constituye ya una realidad. Sin ir más lejos, los mismos ordenadores personales operan, desde hace unos años, mediante dispositivos semiconductores nanométricos. Estos microcircuitos —nanocircuitos, para ser más precisos— de exquisito refinamiento se están fabricando ahora por millones. Sin embargo, no se aprecia debidamente el gran esfuerzo que científicos y técnicos han invertido en su desarrollo. Por ello, este artículo quisiera proclamar sus logros y explicar de qué forma su trabajo ha auspiciado este avance firme, del que disfrutan los usuarios.

Empecemos por preguntarnos si la fabricación de semiconductores debe considerarse nanotecnología. Si tenemos en cuenta que este término engloba todos los dispositivos con dimensiones inferiores a 100 nanómetros y que ya desde 2000 se fabrican puertas de transistor con tales características, la respuesta es decididamente afirmativa. Los circuitos integrados que ahora llegan al mercado operan mediante puertas de apenas 50 nanómetros de anchura; es decir, 50×10^{-9} metros, la milésima parte del grosor de un cabello humano.

Tan diminutas dimensiones permiten encapsular gran cantidad de componentes en un solo bloque. Sin embargo, no es el ahorro de espacio lo que persigue la miniaturización, sino la rebaja del coste unitario por transistor. La reducción del tamaño de las puertas —elementos del transistor que "abren" y "cierran" el paso de la corriente eléctrica— no constituye un objetivo sino más bien una consecuencia. Por añadidura, cuanto más estrechas son éstas, más deprisa pueden conmutar los transistores, lo que permite elevar los límites de velocidad en los circuitos. De ahí que, al crecer el número de transistores de un microprocesador, aumente también su velocidad.

La pretensión de encapsular más transistores en un chip y de hacerlo operar a mayor velocidad explica por qué la industria de los semiconductores, precisamente en el cambio de milenio, ha relevado los microchips por nanochips. La callada superación de ese hito y los posteriores progresos alcanzados constituyen una asombrosa historia de triunfos personales sobre algunos de los retos más importantes de la ingeniería contemporánea, a todas luces tan imponentes como los afrontados en la fabricación de la primera bomba atómica o en el envío del hombre a la Luna.

Preparación de la oblea de silicio

Para hacernos una idea de las innovaciones técnicas que precedieron a los nanochips, examinaremos la evolución de las distintas

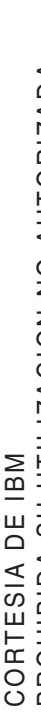
etapas de producción de un semiconductor moderno. Centrémonos, por ejemplo, en la fabricación del microprocesador del ordenador en el que se ha preparado este texto: un chip (Pentium 4) formado por una intrincada red de alrededor de 42 millones de transistores.

La fabricación de un chip empieza por obtener un cristal grande de silicio puro. Para ello se sigue el método tradicional: crecimiento sobre un cristal pequeño sumergido, a modo de simiente, en un baño de silicio fundido. De ahí resulta un lingote cilíndrico —un cristal macizo con la calidad propia de una gema—, del que se cortan multitud de finas obleas.

Se ha comprobado que estos lingotes monocristalinos ya no poseen calidad suficiente para su cometido: presentan demasiados "defectos" estructurales. Estas irregularidades en la red de átomos obstaculizan la circulación de los electrones y, por tanto, deterioran la capacidad conductora del silicio; además, dificultan la fabricación del chip. Por esta razón, hoy es práctica habitual tratar cada oblea con un gas que contenga silicio, de forma que se deposite sobre ella una fina capa de silicio monocristalino, sin imperfecciones. Se aumenta así la velocidad de los transistores.

Pero los expertos han querido ir más lejos. Han conseguido mejorar el proceso mediante la técnica de "silicio sobre aislante", que consiste en extender una delgada capa de óxido aislante bajo la superficie de la oblea, a muy poca profundidad. Con ello se reduce la capacitancia (capacidad de almacenar la carga eléctrica) entre los elementos del transistor y el sustrato de silicio subyacente, capacitancia que de otro modo provocaría pérdida de velocidad y desperdicio de energía. La configuración "silicio sobre aislante" eleva en un 30 por ciento la velocidad de conmutación de los transistores o, como alternativa, reduce la energía que necesitan. Esta ganancia equivale a la que se consigue al avanzar una generación en el tamaño del dispositivo.

IBM, pionera en esta técnica, hace ya cinco años que comercializa

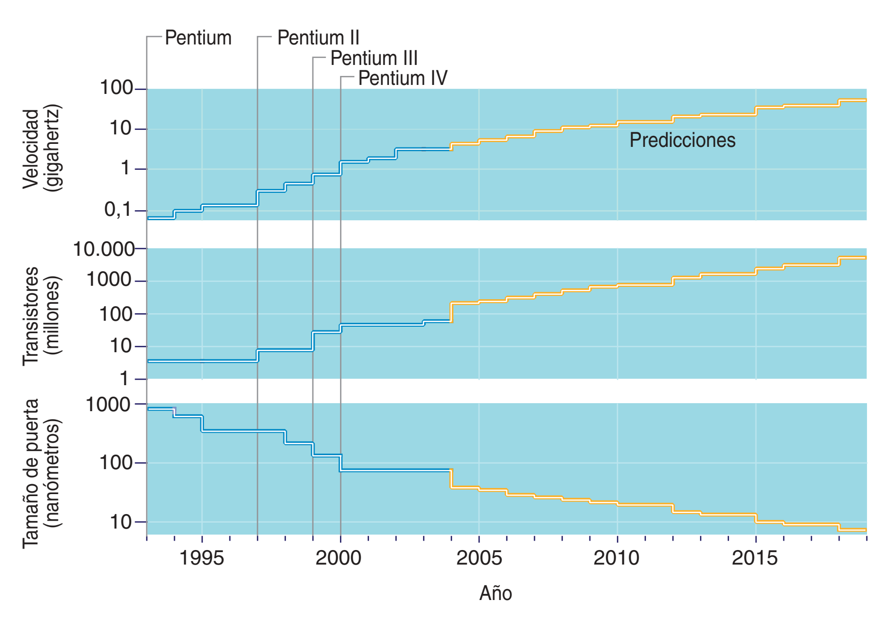


1. LA INNOVACION mejora las prestaciones de los microprocesadores con técnicas que van mucho más allá de la miniaturización de los transistores. Este chip (ampliado 50.000 veces) aumenta la velocidad y ahorra energía al colocar el silicio de los transistores (*azul claro*) sobre una capa de óxido (*verde*).

circuitos integrados de este tipo. El proceso desarrollado por esa empresa, denominado separación por implantación de oxígeno (o SIMOX), consiste en bombardear el silicio con iones de oxígeno, es decir, átomos de oxígeno dotados de carga eléctrica para así acelerarlos hasta velocidades altas. Estos iones se implantan por sí mismos a bastante profundidad, donde se combinan con átomos de la oblea para formar una capa de dióxido de silicio. Un inconveniente del método es que el paso de los iones de oxígeno a través de la red cristalina de silicio origina numerosos defectos, que después deben corregirse cuidadosamente mediante el calentamiento de la superficie. Pero el principal problema reside en la inherente lentitud de la implantación de los átomos de oxígeno, que encarece el proceso. De ahí que IBM haya reservado la técnica de silicio sobre aislante para sus chips más costosos.

Toma cuerpo, no obstante, un método nuevo y más rápido que alcanza el mismo objetivo. El primer paso consiste en formar una capa de óxido aislante directamente sobre una oblea de silicio. Acto seguido, se voltea la superficie oxidada y ésta se adhiere a otra oblea virgen. Tras recortar la mayor parte del silicio que queda sobre la capa de óxido, se consigue la disposición deseada: un delgado estrato de silicio superpuesto a la capa de óxido aislante, todo ello colocado sobre un gran bloque de silicio, que sólo proporciona soporte físico.

La idea surgió del desarrollo de un método para seccionar láminas con precisión. La compañía francesa



2. LOS COMPONENTES DE LOS MICROPROCESADORES entraron en el dominio nanométrico en el transcurso de los diez últimos años. Así se refleja en esta gráfica de la evolución de la serie Pentium de Intel (*azul*). Se observan notables ganancias en velocidad y en cantidad de transistores, debidas ambas a la reducción del tamaño de puerta de los transistores. Según las predicciones (*amarillo*), estas tendencias se mantendrán durante los próximos años.

LUCY READING; FUENTES: INTEL E INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS

que lo logró, Soitec, registró acertadamente esta técnica con la marca Smart Cut ("corte inteligente", en inglés). El proceso consiste en bombardear iones de hidrógeno a través de la superficie oxidada de la primera oblea a fin de que se implanten por sí mismos dentro del silicio subyacente, a la profundidad prescrita. (La implantación de hidrógeno es más rápida que la de oxígeno, por lo que el proceso se abarata.) Dado que los iones de hidrógeno dañan la estructura cristalina sobre todo en el lugar donde se detienen, crean en el interior del silicio una capa más frágil. Así, una vez la oblea tratada se ha girado boca abajo y adherido a otra oblea virgen, se separa enseguida todo lo que queda por encima del plano debilitado. Cualquier aspereza residual se elimina fácilmente puliendo la superficie. La propia IBM emplea ahora el Smart Cut para fabricar chips de alta prestación y AMD (Advanced Micro Devices de Sunnyvale) lo aplicará en su próxima generación de microprocesadores.

El incesante esfuerzo por conseguir transistores más rápidos ha aportado, además, otro cambio esencial en los principios de fabricación de chips: el empleo del "silicio tensado". Si la red cristalina del silicio se somete a un ligero estiramiento (en torno al 1 por ciento), la movilidad de los electrones que lo atraviesan mejora notablemente y, por tanto, aumenta la velocidad de los transistores construidos con ese material. Dicha tensión se consigue mediante la adhesión del silicio a otro material cristalino —en este caso, el silicio-germanio— de mayor separación reticular. Aunque los detalles técnicos de este nuevo enfoque permanezcan en secreto, es sabido que muchos fabricantes ya lo están adoptando. Intel, por

Resumen/Nanochips

- En 2000 la industria de semiconductores inició sin alardes la producción de nanochips (chips con componentes inferiores a los 100 nanómetros, cerca de la milésima parte del grosor de un cabello humano). Estos dispositivos integran hoy muchos de los ordenadores personales.
- La reducción de las dimensiones de los patrones aumenta la velocidad y reduce los costes de fabricación, pues permite integrar más transistores en un solo chip (más de 50 millones). De aquí a pocos años un microprocesador típico decuplicará esa cifra.
- La fabricación de chips ha mejorado notablemente merced a varios avances técnicos, tales como el uso de materiales perfeccionados y de métodos que corrigen las distorsiones que la difracción óptica causa cuando se configuran los chips.

ejemplo, utiliza el silicio tensado en Prescott, la versión avanzada de su procesador Pentium 4, que se empezó a comercializar a finales del año pasado.

Impresión de circuitos nanométricos

El sustrato de silicio no es el único componente que ha progresado. En los últimos años también los transistores han mejorado enormemente en su diseño. Una de las primeras etapas de la fabricación de estos transistores es el crecimiento de una delgada capa de dióxido de silicio sobre la superficie de una oblea. Con ese propósito, la oblea se trata con oxígeno y vapor de agua, lo que permite la oxidación del silicio. Pero aquí el óxido no se desmigaja de la superficie —como ocurre en la carrocería de un coche viejo—, sino que se adhiere firmemente. Así, para propagar la oxidación, los átomos de oxígeno deben difundirse a través del revestimiento de óxido hasta encontrar debajo silicio intacto. La regularidad de esta difusión permite controlar el espesor de las capas de óxido.

En el caso de la fina capa de óxido que aísla las puertas de los diminutos transistores, por ejemplo, la difusión del oxígeno debería limitarse a un tiempo muy breve. Pero en la práctica existe otro problema: esta capa, que en los chips modernos sólo alcanza unos pocos átomos de espesor, es ya demasiado fina para depositarla de modo fiable. Podría esta capa adquirir mayor grosor, pero entonces disminuiría la capacitancia de la puerta. Y aunque la capacitancia sea a menudo un obstáculo a evitar, tampoco conviene reducirla demasiado. La puerta del transistor opera mediante la inducción de carga eléctrica en el silicio subyacente, que crea un canal para el paso de la corriente. Sin una cierta capacitancia, no habría en el canal carga suficiente para la conductividad del transistor.

La solución consiste en utilizar para el aislamiento de la puerta una sustancia distinta del dióxido de silicio. En particular, los fabricantes han concentrado su atención en los materiales de elevada constante dieléctrica (K), como el óxido de hafnio y el titanato de estroncio. Estos permiten formar una capa de óxido más gruesa, y por tanto más resistente, sin menoscabo de la aptitud de la puerta para operar como un conmutador eléctrico diminuto.

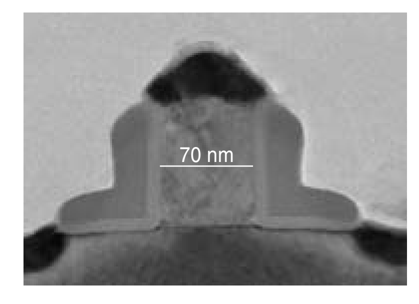
Sin embargo, colocar un aislante de K elevada sobre el silicio no es tan sencillo como dejar sin más que se oxide. La mejor técnica para conseguirlo es la deposición por capas atómicas, en la que se utiliza un gas compuesto de pequeñas moléculas que se adhieren a la superficie, pero no se unen entre sí. Para depositar una película de una sola molécula de espesor basta con exponer la oblea a ese gas el tiempo suficiente para que todos los puntos queden cubiertos. Mediante el tratamiento con un segundo gas, que reacciona con el primero para formar el material del revestimiento, se crea el barniz de grosor molecular. Las aplicaciones sucesivas de estos dos gases van depositando una capa tras otra hasta conseguir el espesor deseado.

Una vez colocado el aislante de la puerta, hay que eliminar selectivamente partes del mismo para dibujar el circuito sobre la oblea. El procedimiento para conseguirlo, la litografía, constituye una pieza esencial en la fabricación de transistores y sus interconexiones. La litografía de los semiconductores se vale de una máscara fotográfica para crear un patrón de luces y sombras que se proyecta sobre una oblea previamente recubierta de fotorresina, una sustancia sensible a la luz. El tratamiento químico y el secado al horno endurecen la fotorresina que no ha recibido luz, cuya misión es proteger, de las posteriores etapas de ataque químico, las zonas que permanecieron a la sombra.

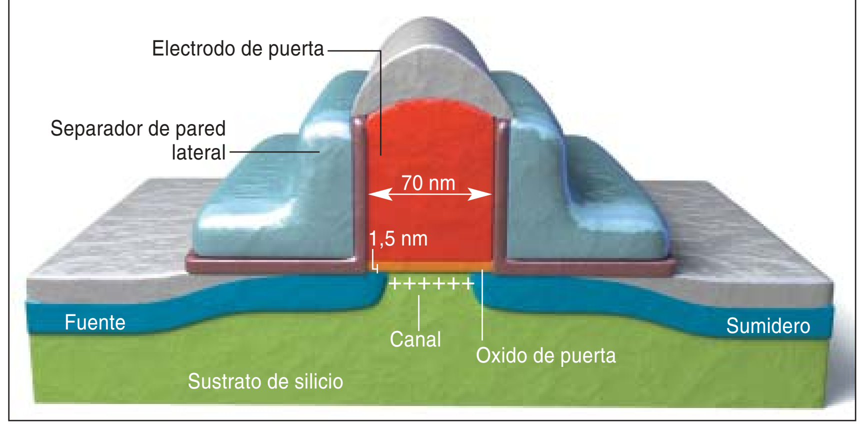
Tiempo atrás se creyó imposible que la litografía pudiera emplearse para definir estructuras menores que la longitud de onda de la luz utilizada. Pero hace ya varios años que, de forma rutinaria, se imprimen diseños de 70 nanómetros con luz ultravioleta de 248 nanómetros. Para hacer realidad tal prodigio hubo que introducir cambios drásticos en la técnica litográfica. Aparecieron instrumentos de nombres complicados —corrección óptica de proximidad, máscaras de desfasaje, láseres excí-

TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO

LA PIEZA FUNDAMENTAL de todo microprocesador es el transistor de efecto de campo, que opera como un sencillo conmutador. La aplicación de un voltaje al electrodo de puerta induce una carga a lo largo del canal. La corriente circula entonces entre la fuente y el sumidero (estado de conducción). Si las puertas son suficientemente pequeñas, estos transistores pueden conmutar entre el estado de conducción y el de corte miles de millones de veces por segundo.



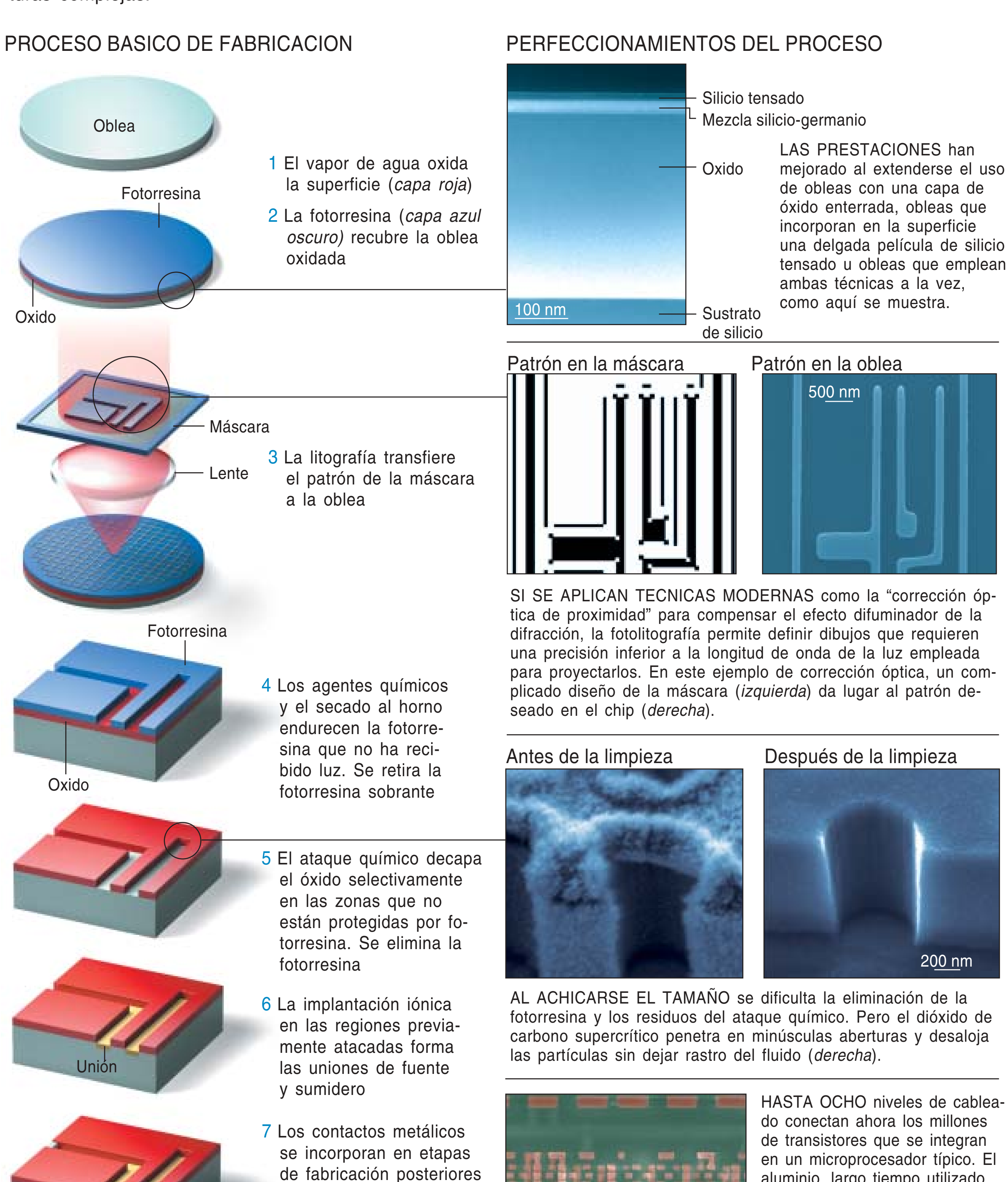
Transistor nanométrico de primera generación, fabricado por Intel.



INTEL (*micrografía*); BRYAN CHRISTIE DESIGN (*ilustración*)

ASI SE FABRICA UN CHIP

UNA OBLEA CIRCULAR de silicio, del tamaño de un plato, constituye el punto de partida para la fabricación del chip. Paso a paso, el proceso esculpe los transistores y sus interconexiones. Algunas de las etapas aquí ilustradas se iteran muchas veces en el transcurso de la producción a fin de construir, capa por capa, estructuras complejas.



1 El vapor de agua oxida la superficie (*capa roja*)

2 La fotorresina (*capa azul oscuro)* recubre la oblea oxidada

3 La litografía transfiere el patrón de la máscara a la oblea

4 Los agentes químicos y el secado al horno endurecen la fotorresina que no ha recibido luz. Se retira la fotorresina sobrante

5 El ataque químico decapa el óxido selectivamente en las zonas que no están protegidas por fotorresina. Se elimina la fotorresina

6 La implantación iónica en las regiones previamente atacadas forma las uniones de fuente y sumidero

7 Los contactos metálicos se incorporan en etapas de fabricación posteriores por medio de litografía

LAS PRESTACIONES han mejorado al extenderse el uso de obleas con una capa de óxido enterrada, obleas que incorporan en la superficie una delgada película de silicio tensado u obleas que emplean ambas técnicas a la vez, como aquí se muestra.

SI SE APLICAN TECNICAS MODERNAS como la “corrección óptica de proximidad” para compensar el efecto difuminador de la difracción, la fotolitografía permite definir dibujos que requieren una precisión inferior a la longitud de onda de la luz empleada para proyectarlos. En este ejemplo de corrección óptica, un complicado diseño de la máscara (*izquierda*) da lugar al patrón deseado en el chip (*derecha*).

AL ACHICARSE EL TAMAÑO se dificulta la eliminación de la fotorresina y los residuos del ataque químico. Pero el dióxido de carbono supercrítico penetra en minúsculas aberturas y desaloja las partículas sin dejar rastro del fluido (*derecha*).

HASTA OCHO niveles de cableado conectan ahora los millones de transistores que se integran en un microprocesador típico. El aluminio, largo tiempo utilizado para este propósito, ha cedido el paso al cobre, que resulta más difícil de colocar pero mejora la velocidad y la integridad de las señales transmitidas por los hilos.

BRYAN CHRISTIE DESIGN (*ilustraciones*); GIANNI TARASCHI *Instituto Tecnológico de Massachusetts* (*arriba*); IMAGENES CORTESIA DE ASML MASKTOOLS (*centro, superior*); IMAGENES CORTESIA DE SC FLUIDS, INC. (*centro, inferior*); CORTESIA DE IBM. PROHIBIDA SU UTILIZACIÓN NO AUTORIZADA (*abajo*)

meros—, aunque basados en un concepto sencillo, al menos en principio: cuando el dibujo requiere una precisión inferior a la longitud de onda de la luz, resulta fácil calcular, y corregir después, las distorsiones debidas a la difracción óptica. Es decir, se puede concebir una disposición de la máscara tal que, tras producirse la difracción, grabe sobre el silicio el patrón deseado. Imaginemos, por ejemplo, que se quiere obtener un rectángulo. Con una máscara perfectamente rectangular, la difracción redondearía los cuatro vértices proyectados sobre el silicio. Por el contrario, si la máscara recuerda la forma de un hueso, el resultado se aproximará más a un rectángulo de vértices bien definidos.

Esta estrategia permite hoy fabricar transistores con diseños de 50 nanómetros de precisión utilizando luz de 193 nanómetros de longitud de onda. Pero las técnicas de corrección de la difracción alcanzan pronto su límite; de aquí el interés en desarrollar medios que proporcionen mayor resolución en la impresión de patrones. El método que ofrece mejores esperanzas retoma la litografía, aunque con longitudes de onda mucho más cortas: las del ultravioleta extremo, o rayos X "blandos" (poco penetrantes), en la terminología de los astrónomos.

A medida que adoptan la litografía del ultravioleta extremo (que reduce en un orden de magnitud las longitudes de onda y, por ende, el tamaño de los patrones de impresión), los fabricantes afrontan nuevos retos. Los prototipos construidos hasta el momento están configurados para una longitud de onda de 13 nanómetros. Se trata de verdaderas maravillas de la ingeniería.

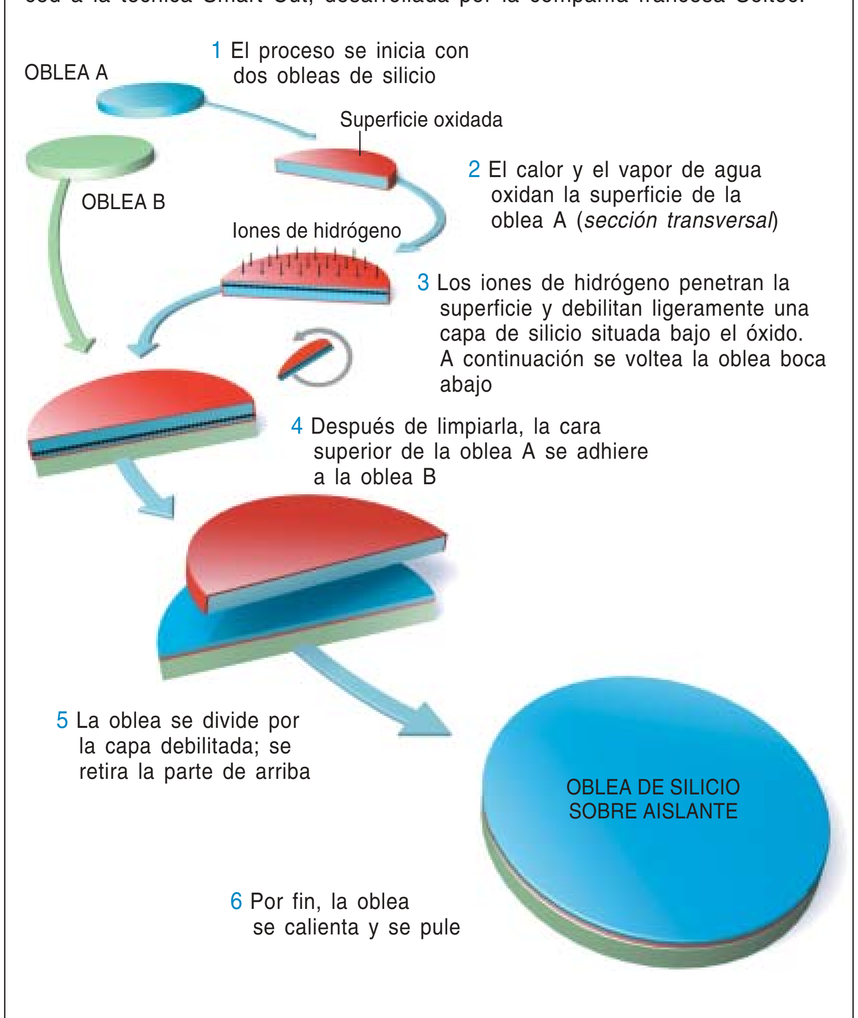
Valga como ejemplo el equipo necesario para proyectar imágenes sobre las obleas. Dado que todos los materiales presentan una fuerte absorción a las longitudes de onda del ultravioleta extremo, dichas cámaras no pueden utilizar lentes, pues serían prácticamente opacas. En su lugar, deben servirse de espejos muy refinados. Por esa misma razón, las máscaras deben ser muy diferentes de las pantallas de vidrio de la litografía clásica. El trabajo en el ultravioleta extremo exige máscaras que absorban y reflejen la luz. Para fabricarlas se depositan docenas de capas de molibdeno y silicio, de pocos nanómetros de espesor cada una. Se obtiene así una superficie altamente reflectante sobre la que se aplica una capa de cromo grabada para absorber luz precisamente en los lugares apropiados.

Como ocurre con muchos otros elementos que intervienen en la fabricación de chips, estas máscaras no admiten imperfecciones. Por tanto, resulta imprescindible desarrollar una técnica que permita detectar posibles defectos a longitudes de onda tan ínfimas. He aquí otro reto para los expertos. Científicos e ingenieros de empresas, laboratorios e instituciones académicas estadounidenses y europeas colaboran en la búsqueda de soluciones para superar estos y otros obstáculos técnicos y hacer así practicable la litografía del ultravioleta extremo. Por ahora, sin embargo, la industria debe aceptar los límites de la litografía estándar y trabajar con precisiones no inferiores a los 50 nanómetros.

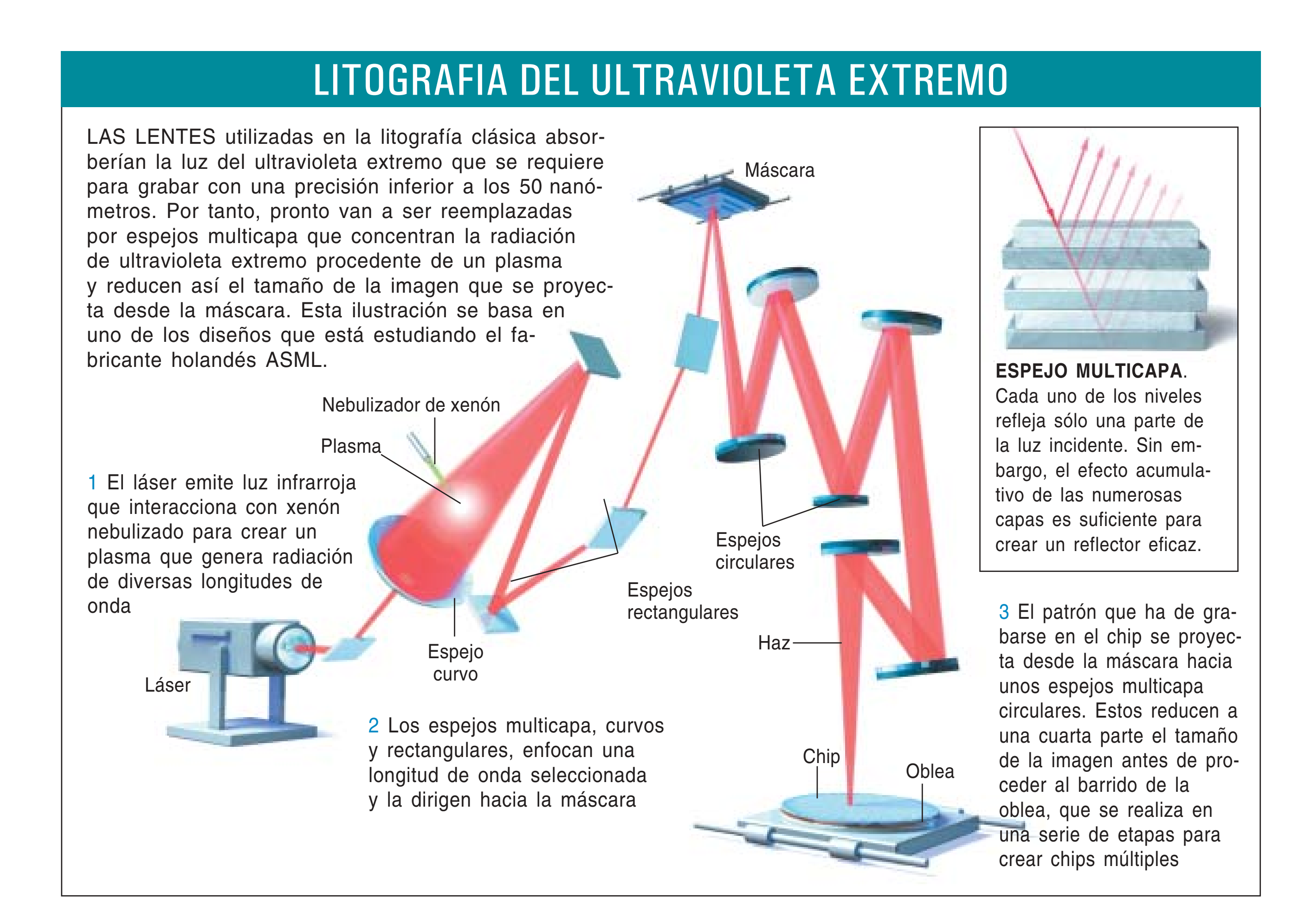
La impresión fotolitográfica de tales patrones en una película de fotorresina constituye sólo la primera de una serie de manipulaciones necesarias para esculpir la oblea subyacente. Además, hay que idear la forma de eliminar las partes de fotorresina que han sido expuestas a la luz y atacar con agentes químicos el material que queda al des-

PREPARACION DE UNA OBLEA

LA TECNICA DE SILICIO sobre aislante, que ha mejorado notablemente las prestaciones de los chips, es ahora más económica y fácil de aplicar merced a la técnica Smart Cut, desarrollada por la compañía francesa Soitec.



BRYAN CHRISTIE DESIGN



BRYAN CHRISTIE DESIGN

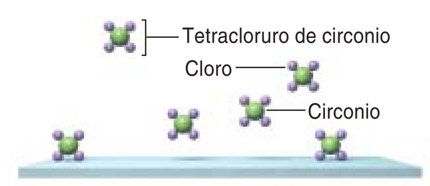
cubierto, con cuidado de no invadir las zonas contiguas. Debe, por último, poderse retirar la fotorresina y los residuos del ataque químico, trabajo rutinario que se complica sobremanera cuando se han achicado tanto las dimensiones del patrón.

Para comprender mejor el problema, imaginemos los circuitos nanométricos que se imprimen en el chip como un conjunto de rascacielos altos y delgados separados por estrechos desfiladeros. A tan diminuta escala, el uso de los detergentes tradicionales provoca oleadas viscosas que fácilmente derribarían elementos del circuito. Aun cuando tal catástrofe pudiera evitarse, estos líquidos presentan una molesta tendencia a obstruir los cañones nanométricos.

Durante el decenio de los noventa se encontró en el Laboratorio Nacional de Los Alamos una solución ingeniosa: los fluidos supercríticos. La innovación consiste en utilizar dióxido de carbono a presión y temperatura elevadas, suficientes para situarlo por encima de su punto crítico (punto en el cual las propiedades de la fase líquida y gaseosa se hacen tan similares, que resultan indistinguibles). En estas condiciones, el CO_2 toma la apariencia líquida, pero conserva una importante propiedad del gas: la falta de viscosidad. Por consiguiente, el CO_2 supercrítico fluye con libertad debajo de las partículas y puede desalojarlas mecánicamente con más eficacia que cualquier sustancia húmeda. (No es casual que el uso del dióxido de carbono supercrítico se haya extendido en el sector de limpieza en seco de tejidos.) Mezclado con otros disolventes, resulta muy eficaz para deshacer la fotorresina. Y, por si fuera poco, se elimina fácilmente una vez efectuada la limpieza: al disminuir la presión (a niveles atmosféricos, por ejemplo) se evapora como un gas normal.

Limpia y seca, la oblea queda de esta forma preparada para la etapa siguiente: la incorporación de las uniones del transistor, esto es, unas "bañeras" que a uno y otro lado de la puerta sirven como "fuente" y "sumidero" de la corriente. Tales uniones se realizan infundiendo en el silicio trazas de elementos químicos (impurezas) que lo transforman de semiconductor en conductor. El método habitual consiste en lanzar iones de arsénico o boro a la superficie del silicio mediante un implantador iónico. Una vez depositados, tales iones deben activarse: suministrarles la energía que necesitan para incorporarse por sí mismos a la red cristalina. Esta etapa de activación exige calentar el silicio, lo que, por desgracia, suele provocar la difusión del arsénico y el boro hacia el interior.

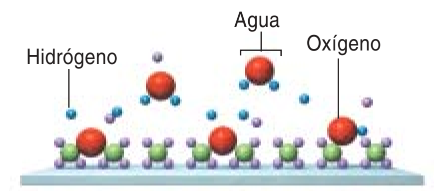
Para conjurar este efecto secundario indeseado, la temperatura debe aumentarse con rapidez suficiente para que sólo se caliente una fina capa en la cara superior. De esta forma se garantiza que la superficie se enfríe prestamente por sí misma. Los sistemas actuales se calientan y enfrían a razón de miles de grados por segundo. Pese a



1 La superficie se expone a un primer gas, el tetracloruro de circonio ($ZrCl_4$).



2 Las moléculas de $ZrCl_4$ se adhieren a la superficie, pero no se unen entre sí.



3 La superficie revestida se expone a un segundo gas, el vapor de agua (H_2O).



4 El $ZrCl_4$ de la superficie reacciona con el agua (H_2O) para formar dióxido de circonio (ZrO_2). Se consigue así una capa de barniz de una sola molécula de espesor.

3. LA DEPOSICION **por capas atómicas permite extender revestimientos extremadamente delgados. La repetición cíclica de estas etapas forma, molécula a molécula, la cobertura del grosor deseado.**

todo, los átomos de arsénico y de boro todavía se difunden demasiado, con lo que las uniones resultan más gruesas que lo requerido para una velocidad óptima. Se está desarrollando, sin embargo, otra técnica que pronto se incorporará a la fabricación: el procesamiento térmico por láser. Capaz de variar la temperatura a razón de hasta cinco mil *millones* de grados por segundo, este método, a punto de entrar en la cadena de montaje, promete impedir casi por completo la difusión y de esta forma conseguir unas uniones extremadamente superficiales.

Terminados los transistores, a menudo se añaden millones de condensadores para construir una memoria dinámica de acceso aleatorio (DRAM, de "dynamic random-access memory"). Los condensadores utilizados en las DRAM se han miniaturizado tanto en los últimos tiempos, que presentan problemas de fabricación parecidos a los de las puertas de los transistores. La respuesta, una vez más, parece encontrarse en la deposición por capas atómicas, adoptada para la fabricación de la última generación de chips DRAM.

Recuperación de viejas técnicas

La deposición por capas atómicas facilita el desarrollo de la siguiente fase de fabricación, aunándolo todo. Se trata ahora de depositar primero una capa aislante de vidrio sobre la que se imprime y graba un patrón de líneas. A continuación, se rellenan los surcos con metal para formar los hilos conductores. Estas operaciones se repiten para formar de seis a ocho capas de conexiones entrecruzadas. Si bien tradicionalmente se utilizaba aluminio, en los últimos años se ha sustituido ese metal por el cobre con miras a elevar la velocidad de operación y preservar mejor la integridad de las señales. El problema es que el cobre contamina las uniones y por ello es preciso colocar debajo una delgada barrera conductora (que no merme la velocidad del chip). El obstáculo se ha resuelto, de nuevo, mediante la deposición por capas atómicas.

El cambio de metal también ha resultado conflictivo por otra razón: la deposición del cobre es por sí misma engañosa. Se ensayaron varios métodos avanzados, pero ninguno fructificó. Tras tanta frustración, los ingenieros de IBM recurrieron, por fin, a una vieja técnica, la galvanoplastia. En aquel momento, la idea de pulimentar una oblea por medios abrasivos (el tratamiento galvanoplástico deja una superficie irregular que debe pulirse por medios mecánicos) era inconcebible para los responsables de esta industria, totalmente obsesionados por la limpieza. De ahí que los primeros técnicos de IBM que ensayaron este procedimiento no solicitaran el permiso de sus superiores. Su audacia se vio recompensada al descubrir que se habían eliminado imperfecciones superficiales molestas y que la oblea pulimentada se prestaba mejor a la litografía así como a la deposición de películas en las siguientes etapas del proceso.

La lección a extraer de todo ello es que los métodos aparentemente anticuados pueden ser tan valiosos como las técnicas de vanguardia. En efecto, en los últimos años, la industria de los semiconductores ha sacado gran partido de las combinaciones de lo clásico y lo moderno. El progreso alcanzado atestigua la capacidad y el talento de los innumerables ingenieros y científicos que sin tregua perfeccionan el proceso básico de fabricación de circuitos integrados, hoy ya con más de cuarenta años a la espalda.

De aquí a otros cuarenta años, ¿será éste un proceso muy distinto del actual? Aunque algunos futurólogos sostienen que a mediados de este siglo una nueva nanotecnología exótica revolucionará la electrónica, apuesto a que la industria de los semiconductores permanecerá en gran parte intacta pese a incorporar otra serie de avances técnicos asombrosos, que hoy ni siquiera podemos imaginar.

El autor

G. Dan Hutcheson, formado en la Universidad estatal de San José, dirige y preside VLSI Inc., compañía dedicada a los estudios de mercado y análisis económicos, al servicio de la industria de los semiconductores.

Bibliografía complementaria

HACIA EL "CERO COMA UNO". Gary Stix en *Investigación y Ciencia*, n.º 223, págs. 70-75; abril de 1995.

FUTURO DE LA INDUSTRIA DE LOS SEMICONDUCTORES. G. Dan Hutcheson y Jerry D. Hutcheson en *Investigación y Ciencia*, n.º 234, págs. 20-27; marzo de 1996.

HANDBOOK OF SEMICONDUCTOR MANUFACTURING TECHNOLOGY. Preparado por Yoshio Nishi y Robert Doering. Marcel Dekker, 2000.

La evolución codificada

Nuevos descubrimientos concernientes a las reglas que gobiernan la codificación génica de las proteínas han revelado cuán excelente es la "programación" con la que la naturaleza protege a la vida de errores catastróficos y acelera su evolución

Stephen J. Freeland y Laurence D. Hurst



El 14 de abril de 2003 se anunció la secuenciación del genoma humano, un inventario de los 3000 millones de pares de nucleótidos de ADN que encierran los planos de construcción de un ser humano. Subsiste, empero, el difícil problema de separar todos los genes funcionales de los residuos sin valor, amén de lograr un conocimiento más pleno del cómo y el cuándo de la activación génica, de qué modo afectan sus instrucciones al comportamiento de las proteínas que cifran. No es maravilla, pues, que el director del Proyecto Genoma Humano, Francis S. Collins, dijera que la hazaña de su grupo era solamente "el fin del principio".

Collins aludía también a otro acontecimiento conmemorado esa misma semana: el principio del principio, ocurrido 50 años antes, cuando James D. Watson y Francis H. Crick desvelaron la estructura de la molécula misma de ADN. Fue aquélla, asimismo, una época apasionante. Se sabía que la molécula que habían conseguido visualizar encerraba nada menos que el secreto de la vida, que era la molécula que permitía a los organismos compendiarse a sí mismos en un conjunto de instrucciones de montaje, para después convertir otra vez en metabolismo vivo la información así inscrita. Los esfuerzos para desentrañar la forma en que se producía esta conversión mantuvieron embelesada a la comunidad científica durante los años siguientes.

Se sabía que el alfabeto del ADN constaba sólo de cuatro tipos de nucleótidos. Por consiguiente, las reglas que *descodificasen* la información encerrada en la doble hélice tenían que indicar a las células cuáles, de los 20 aminoácidos, debían concatenarse entre sí para formar los millares de proteínas de que se componen los varios miles de millones de distintos tipos de organismos. De hecho, la totalidad de la biosfera vive en un permanente y frenético proceso de descodificación conforme hacen eclosión los huevos, germinan las semillas, proliferan los hongos y se escinden las bacterias.

Pero en aquellos tiempos el conocimiento sobre los mecanismos celulares implicados en la traducción del mensaje del ADN era tan limitado, que las tentativas de descifrar el código genético se centraron sobre todo

SECUENCIAS DE TRES "LETRAS", llamadas codones, del ADN y del ARN (*cuadrados rotulados*) codifican los aminoácidos con los que se edifica y mantiene la vida de la Tierra.

SLIM FILMS

en los aspectos matemáticos del problema. Muchas de las propuestas iniciales resultaron erróneas, a pesar de que su originalidad y sagaz ingenio siguen constituyendo una lectura fascinante. Hasta el extremo de que, cuando el verdadero código se descifró por fin en los años sesenta del siglo pasado, resultó punto menos que decepcionante. La versión de la naturaleza parecía menos elegante que las hipótesis de los teóricos.

La muy excelente obra de programación que el código genético es en realidad, no ha quedado de manifiesto hasta hace pocos años, merced a nuevos descubrimientos. Han empezado a aclararse las razones de que la naturaleza eligiese tales reglas fundamentales, así como la causa de que esas normas hayan persistido a lo largo de unos tres mil millones de años de selección natural. Estamos ya capacitados para mostrar que las reglas del código podrían acelerar la evolución, al tiempo que protegen a la vida de la comisión de errores desastrosos en la síntesis de proteínas. El estudio del código está proporcionando también claves para la resolución de algunos de los problemas que se les plantean a los laboratorios en la era posgenómica. Y al remontarnos hasta los comienzos mismos, con el propósito de comprender las reglas del código subyacente a la vida, vamos descubriendo instrumentos útiles para futuras investigaciones.

Al hablar de "código" y de "descodificación" nos estamos expresando en un sentido bastante literal. Las instrucciones genéticas están almacenadas en el ADN y en el ARN, compuestos ambos, a su vez, por un ácido nucleico. Pero los organismos se hallan en su mayor parte construidos a partir de un tipo de moléculas muy diferentes, las proteínas. Así, aunque tradicionalmente se diga que un gen consiste en una secuencia de nucleótidos que contiene la descripción de una proteína, la sentencia genética que contiene tal descripción debe traducirse antes desde un cierto sistema de símbolos hacia otro sistema cuyos símbolos son totalmente distintos.

El descifrado del código

Cuando Watson y Crick expusieron la estructura del ADN en 1953, ellos y sus contemporáneos pudieron apreciar que los genes estaban escritos con un alfabeto que constaba de sólo cuatro "letras", las bases nitrogenadas adenina, citosina, guanina y timina (A, C, G, T); caracterizan a cada nucleótido y forman los peldaños de la doble hélice del ADN. El alfabeto de las proteínas, en cambio, constaba de 20 aminoácidos distintos, por lo que resultaba evidente que, para especificar un aminoácido dado cualquiera, sería necesaria una "palabra" genética polinucleótida. Las combinaciones binarias (con repetición) de dos letras seleccionadas entre las cuatro bases generan solamente 16 palabras, o "codones."

Las combinaciones ternarias, en cambio, en las cuales las letras se toman de tres en tres, permiten 64 codones posibles, que son holgadamente suficientes para determinar los 20 aminoácidos.

Poco más se sabía entonces sobre la traducción de los genes en proteínas. Ahora comprendemos que las secuencias génicas sí se valen de codones de tres letras para especificar aminoácidos individuales; conocemos también que se requieren varias etapas para que la secuencia de bases del gen se convierta en una secuencia de aminoácidos. En primer lugar, el gen de ADN se copia, corrige y transcribe en ARN, ácido nucleico que utiliza bases similares a las empleadas por el ADN con la salvedad de que, por timina, porta uracilo. Después, la maquinaria celular lee esta versión del gen, copiada en ARN mensajero (ARNm), a razón de tres letras cada vez, al tiempo que la molécula de ARN de transferencia (ARNt) se encarga de traer los aminoácidos especificados, para su mutuo engarce.

Pero en los primeros años de la década de los cincuenta este proceso era totalmente opaco, una caja negra que dejaba solamente entrever un intrigante rompecabezas matemático. Y la primera solución propuesta no llegó de los biólogos, sino de George Gamow, físico que ideó la teoría de la gran explosión. Su "código diamante", publicado en 1954, combinaba con elegancia los aspectos aritméticos de la obtención de 20 "significados" aminoacídicos a partir de un alfabeto de cuatro nucleótidos con la estructura física del propio ADN.

Según Gamow, en cada vuelta de la doble hélice había un hueco de forma rómbica (el diamante de la baraja), delimitado por nucleótidos situados en sus cuatro vértices. Esos huecos permitirían al ADN actuar a modo de una falsilla sobre la cual se alinearían los aminoácidos, determinados por las combinaciones de nucleótidos presentes en cada vuelta. En su modelo se eliminaba un vértice de cada rombo; después, los 64 codones trinucleótidos se clasificaban en grupos químicamente emparentados. El modelo consentía también que los codones significativos se traslapasen, dependiendo del "marco de lectura" o del lugar donde comenzase la lectura de la secuencia de letras a lo largo de la molécula de ADN. Semejante economía en la compresión de datos resultaba muy apreciada por los teóricos de la época. Pero no tardaron en descubrirse cadenas de aminoácidos cuya explicación no podía hallarse ni por el método de Gamow ni por ningún otro de los códigos de solapamiento.

Al propio tiempo, los datos existentes parecían negar una interacción directa entre el ADN y los aminoácidos. Crick elaboró una hipótesis según la cual unas moléculas, llamadas adaptadoras, podrían servir de intermediarias; enunció, ya en 1957, una serie de reglas a las que podría atenerse el funcionamiento de dichas moléculas. En términos simples, las moléculas adaptadoras de Crick reconocían sólo 20 codones significativos, correspondientes a los 20 aminoácidos; las ternas de nucleótidos restantes, hasta las 64 posibles, carecían de significado. El código de Crick, en lugar de solapamientos, era un código "sin comas": los codones sin significado les resultaban invisibles a las moléculas adaptadoras, por lo que la naturaleza no precisaba de una puntuación figurativa para designar el comienzo de un marco de lectura. El modelo "sin comas" era tan estilizado y elegante, que se ganó la aceptación casi universal. La mereció hasta que los hechos demostraron que, no obstante su rigor aparente, se trataba de una teoría errónea.

Experimentos realizados en los primeros años sesenta demostraron que incluso los codones presuntamente faltos de significado podían provocar en un matraz la síntesis de proteínas. Hacia 1965 se habían establecido ya *in vitro* los significados genuinos de la totalidad de los 64 codones ternarios. No parecían existir relaciones numéricas claras. Ciertos codones eran redundantes: diversos aminoácidos podían estar especificados por dos, cuatro, e incluso seis codones diferentes. Después de tantas entusiastas especulaciones, muchos llegaron a considerar que el código real de la naturaleza era poco más que una casualidad evolutiva.

¿Un azar fosilizado?

En efecto: ya descifrado el código, se descubrió que, de las bacterias a los humanos, los organismos empleaban las mismas reglas de codificación. Parecía como si nada hubiera cambiado en los miles de millones de años transcurridos desde que los tres dominios fundamentales de la vida —*archaea*, bacterias y eucariotas— divergieron a partir de un antepasado común. En consecuencia, el sencillo y persuasivo argumento de la "casualidad fosilizada", propuesto por Crick en 1968, presidió el pensamiento científico hasta no hace mucho. "La correspondencia entre los codones y los aminoácidos fue en este punto cosa enteramente debida al azar", escribió. Pero una vez que el código se hubo concretado en una cierta forma, resultó tan fundamental para la vida, que cualquier cambio ulterior hubiera desencadenado una catástrofe.

La selección natural darwinista se funda en la premisa de que, en ocasiones, un pequeño cambio en un

Resumen/El código de la vida

- Las instrucciones genéticas para la síntesis de proteínas están escritas en "palabras" de tres letras, llamadas codones. Cada codón especifica uno de los 20 aminoácidos o bien una señal traductora de paro ("stop"). En otro tiempo se supuso que la disposición de estos codones y de sus significados aminoacídicos se debieron al azar, pero los descubrimientos recientes indican que ha sido la selección natural la que ha elegido y mantenido este orden.
- Simulaciones computarizadas han revelado el motivo: al comparar el código estándar con otros hipotéticamente posibles, aquél resulta extraordinariamente eficaz en la minimización de los daños causados por errores en los propios genes o en el proceso de traducción de los genes a proteínas.

EL CODIGO DE LA NATURALEZA

SI SE ACEPTA que cada secuencia génica describe una proteína, resulta que las unidades básicas de tales secuencias son "palabras" de tres letras. Cada codón, o tríada, se traduce en uno de los 20 aminoácidos o en una señal de "paro de la traducción". La maquinaria celular transcribe los genes del ADN a versiones en ARN —cuyos bloques nucleotídicos de construcción se representan por las letras A, C, G y U— y finalmente traduce los genes del ARN, codón tras codón, en la cadena de aminoácidos correspondiente. A principios de los años sesenta se establecieron las definiciones exactas de la naturaleza de los aminoácidos dadas por la naturaleza (*abajo*). Pero la importancia de las regularidades del código tardó todavía varios decenios en apreciarse.

SINONIMOS Y SEMEJANZAS

De los 64 posibles codones de tres letras hay varios que especifican un mismo aminoácido; ello significa que habrá formas diversas de cifrar una proteína. Tales codones sinónimos tienden a diferir en una letra, la última, por lo común, formando una pauta de bloques. Los codones correspondientes a aminoácidos de parecida afinidad por el agua también tienden a diferir en su última letra; mientras que los codones que comparten una misma primera letra suelen codificar aminoácidos que son productos o precursores unos de otros. Tales propiedades resultan decisivas para la supervivencia de los organismos; podrían incluso haber contribuido a acelerar su evolución.

Posición del segundo nucleótido

Posición del primer nucleótido	U	C	A	G
U	UUU Fenilalanina UUC Fenilalanina UUA Leucina UUG Leucina	UCU Serina UCC Serina UCA Serina UCG Serina	UAU Tirosina UAC Tirosina UAA STOP UAG STOP	UGU Cisteína UGC Cisteína UGA STOP UGG Triptófano
C	CUU Leucina CUC Leucina CUA Leucina CUG Leucina	CCU Prolina CCC Prolina CCA Prolina CCG Prolina	CAU Histidina CAC Histidina CAA Glutamina CAG Glutamina	CGU Arginina CGC Arginina CGA Arginina CGG Arginina
A	AUU Isoleucina AUC Isoleucina AUA Isoleucina AUG Metionina	ACU Treonina ACC Treonina ACA Treonina ACG Treonina	AAU Asparagina AAC Asparagina AAA Lisina AAG Lisina	AGU Serina AGC Serina AGA Arginina AGG Arginina
G	GUU Valina GUC Valina GUA Valina GUG Valina	GCU Alanina GCC Alanina GCA Alanina GCG Alanina	GAU Aspartato GAC Aspartato GAA Glutamato GAG Glutamato	GGU Glicina GGC Glicina GGA Glicina GGG Glicina

LUCY READING

gen puede resultar beneficioso si ello permite a los organismos desenvolverse mejor en su ambiente. Ahora bien, la modificación de las reglas de descodificación de un organismo entrañaría la introducción simultánea de cambios en un sinfín de sitios de su dotación genética, con la alteración consiguiente de sus funciones metabólicas. Sería la diferencia entre introducir un nuevo signo tipográfico en una máquina de escribir (la mutación) y reorganizar por completo su teclado (alteración de la descodificación).

Este razonamiento, tan directo y atractivo, peca de un reduccionismo simplista. Si bien la gran mayoría de los sistemas vivos utilizan el código genético estándar, se conocen por lo menos 16 variantes, repartidas por una amplia gama de linajes evolutivos, que asignan a ciertos codones significados diferentes. El sistema subyacente sigue siendo el mismo: codones de tres nucleótidos que se traducen en aminoácidos. Pero mientras que la mayoría de los organismos, al leer en el ARN el codón "CUG", entenderían que se trataba del aminoácido leucina, no pocas especies de *Candida*, un hongo, traducen "CUG" por serina. Las mitocondrias, diminutos generadores de energía que encontramos en todo tipo de células, tienen su propio genoma; muchas han desarrollado también asignaciones idiosincrásicas para los codones. Por ejemplo, en el genoma mitocondrial de la levadura del pan (*Saccharomyces cerevisiae*), cuatro de los seis codones que de ordinario se traducen en leucina codifican, en cambio, a la treonina.

Conforme fueron multiplicándose los descubrimientos sobre tales variantes en el curso del decenio de los noventa, se hizo cada vez más evidente que el código no está, en absoluto, "fosilizado". Puesto que evoluciona, cabe presumir que *evolucionó*. Por tanto, las correspondencias normales de codones y aminoácidos, refinadas y preservadas a lo largo de miles de millones de años de selección natural, no han sido una casualidad. A decir verdad, la forma en que tal correspondencia se halla organizada realiza un excelente trabajo de minimización del impacto de accidentes.

Control de daños

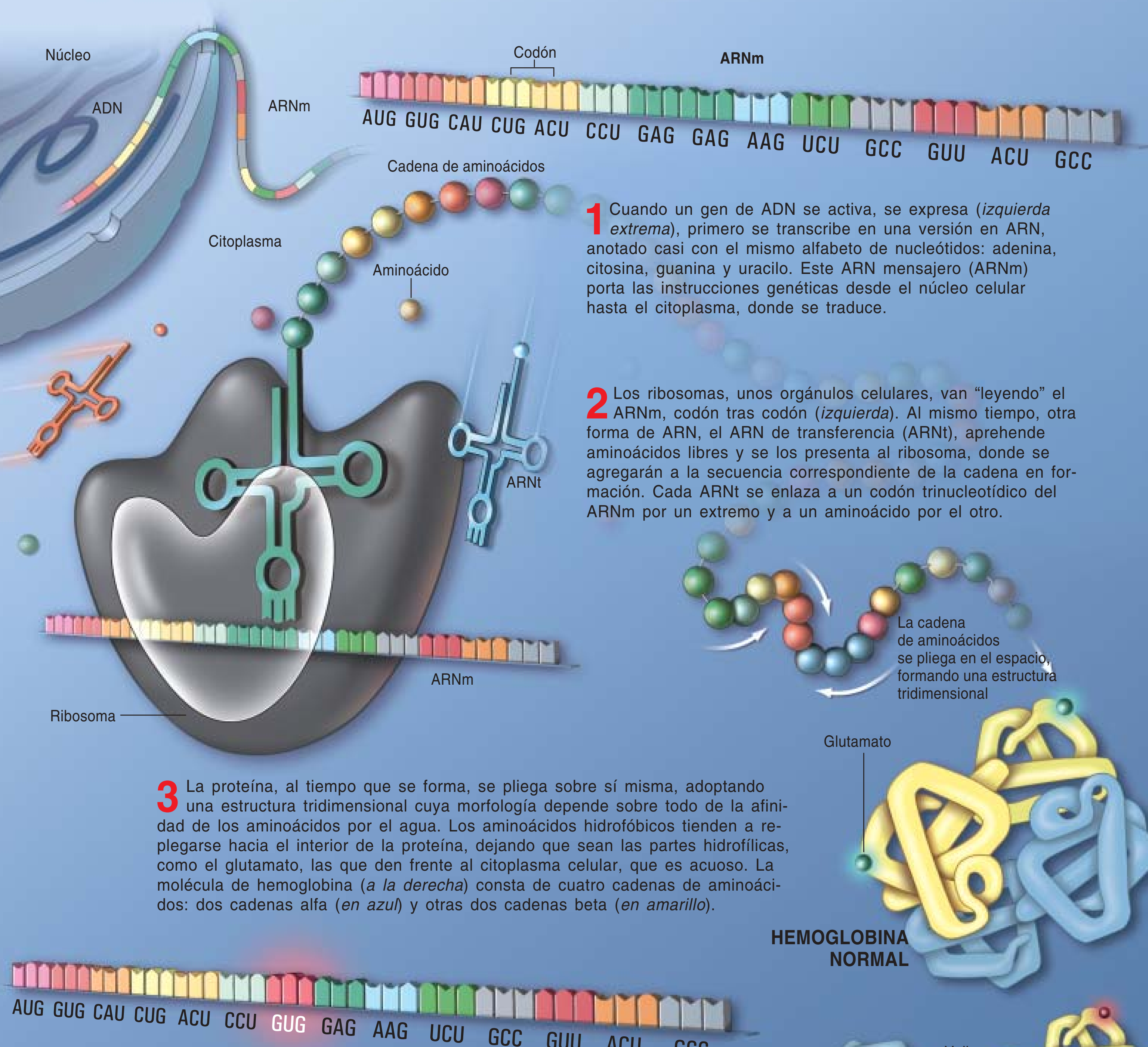
Todo sistema de codificación ha de habérselas con posibles errores. Pero no todos los errores comportan la misma insidia. En nuestro idioma, las vocales y las consonantes son muy diferentes, por lo que la sustitución de las "a" por "s" hsce lss frsses cssi sbsurdss. En cambio, las letras "s" y "z" tienen un zonido zimilar, azí que ezta fraze zigue ziendo comprenzible. En el caso de sistemas propensos a errores, una estrategia de codificación eficaz sería la que redujera los efectos de los fallos ocasionales, inevitables.

En los organismos, los errores se producen de muchas formas. Unas veces, se modifica, por mutación, la versión original en ADN de un gen. En otras ocasiones, un adaptador indebido (un ARNt) se une al transcrito ARNm de un gen y agrega erróneamente un cierto aminoácido a una proteína en formación. Pero incluso en la época en que se creía que el código era producto del azar,

Protección de las proteínas

El código de la naturaleza minimiza los efectos de los errores genéticos, se deban a mutaciones en los propios genes o a fallos del proceso de traducción. Una secuencia génica se traduce en una secuencia correspondiente de aminoácidos, que dicta la estructura tridimensional definitiva que adquirirá la proteína cifrada (*1, 2 y 3*).

Incluso en el caso de que se agregue, por error, un aminoácido indebido, la organización del código garantiza que el inserto sea, de ordinario, químicamente similar al correcto, de suerte que apenas si se resiente la proteína sintetizada. Una excepción, ilustrativa del tipo de daño que puede provocar un error en un solo nucleótido, nos la ofrece la anemia falciforme (*abajo*).



1 Cuando un gen de ADN se activa, se expresa (*izquierda extrema*), primero se transcribe en una versión en ARN, anotado casi con el mismo alfabeto de nucleótidos: adenina, citosina, guanina y uracilo. Este ARN mensajero (ARNm) porta las instrucciones genéticas desde el núcleo celular hasta el citoplasma, donde se traduce.

2 Los ribosomas, unos orgánulos celulares, van “leyendo” el ARNm, codón tras codón (*izquierda*). Al mismo tiempo, otra forma de ARN, el ARN de transferencia (ARNt), aprehende aminoácidos libres y se los presenta al ribosoma, donde se agregarán a la secuencia correspondiente de la cadena en formación. Cada ARNt se enlaza a un codón trinucleotídico del ARNm por un extremo y a un aminoácido por el otro.

3 La proteína, al tiempo que se forma, se pliega sobre sí misma, adoptando una estructura tridimensional cuya morfología depende sobre todo de la afinidad de los aminoácidos por el agua. Los aminoácidos hidrofóbicos tienden a replegarse hacia el interior de la proteína, dejando que sean las partes hidrofílicas, como el glutamato, las que den frente al citoplasma celular, que es acuoso. La molécula de hemoglobina (*a la derecha*) consta de cuatro cadenas de aminoácidos: dos cadenas alfa (*en azul*) y otras dos cadenas beta (*en amarillo*).

UN ERROR CRITICO: En el gen de la hemoglobina existen varias mutaciones que permanecen “silentes” (no provocan enfermedad), pues los aminoácidos sustituidos lo fueron por otros similares. Pero si se produce el error de que un aminoácido hidrófilo se remplace por otro hidrófobo, puede alterarse drásticamente la forma y la función de la proteína resultante. En la enfermedad de anemia falciforme, una mutación, que afecta a un solo nucleótido en el gen correspondiente a la cadena beta de la hemoglobina, cambia el codón CAG del ARNm en el codón CUG (*arriba*), con la sustitución consiguiente del aminoácido glutamato, hidrófilo, por el aminoácido valina, hidrófobo. Los correspondientes lugares hidrófobos de la superficie de la hemoglobina se ven arrastrados unos hacia otros, haciendo que las moléculas se apilen juntas (*a la derecha*) produciendo fibras rígidas que deforman los hematíes y les dan forma de hoz.

se observó que parecía estar bien configurado para garantizar que los errores solitarios apenas tuvieran repercusión. Ya en 1965, Carl R. Woese, a la sazón en la Universidad de Illinois, descubrió que los codones similares (los que compartían dos de tres letras) solían especificar aminoácidos similares, por lo que un error cometido acá o allá no afectaba sustancialmente a la proteína resultante.

Precisar el significado de "similares" cuando se habla de aminoácidos no constituye una tarea fácil. Los 20 aminoácidos divergen unos de otros por su forma, tamaño y carga eléctrica. Lo que observaron Woese y otros fue que los codones que comparten dos de las tres bases propenden a corresponderse con aminoácidos que se asemejan mucho en la medida en que son atraídos o repelidos por el agua. Esta propiedad (hidrofobicidad) es crucial para el funcionamiento de las proteínas. Una cadena de aminoácidos recién formada se pliega de una forma característica en función de las posiciones que ocupen los aminoácidos hidrófobos, que prefieren juntarse y apiñarse al tratar de alejarse del citoplasma celular, que es acuoso, dejando así que sean los hidrófilos los que formen la superficie de la proteína.

Merece destacarse cierta peculiaridad del código genético: cuando se produce un error mononucleótido, el aminoácido realmente agregado y el que debía haber sido presentan, a menudo, pareja hidrofobicidad, por cuya razón la alteración que sufre la proteína resultante es relativamente inocua. Ahora bien, ¿cuál es el grado de eficacia del código en este respecto? En torno a esa cuestión empezó, en 1998, nuestra intervención. Nos propusimos desarrollar las observaciones de quienes nos habían precedido.

El código, a prueba

Empezamos por calcular la hidrofobicidad de los 20 aminoácidos. Los valores obtenidos nos sirvieron para estimar el error del código genético, que definimos como el valor medio de la variación de hidrofobicidad que experimentan los aminoácidos resultantes de cambiar una sola letra, de todas las formas posibles, en el conjunto de los 64 codones del código. Dicho valor representa la proclividad del código genético a los errores; por sí solo, carece, sin embargo, de mayor interés. Era necesario saber en qué puesto quedaría situado el sistema de codificación de la naturaleza al compararlo con otros códigos teóricamente posibles.

Para generar esa gavilla de códigos hipotéticos, hubimos de partir de ciertos supuestos, concernientes a restricciones que verosímilmente tendrían que respetar un código que funcionase en un mundo de ADN, ARN y aminoácidos. Importa señalar que los errores de traducción del ARNm en el correspondiente aminoácido se dan con mayor frecuencia en la tercera posición del codón. Este lugar corresponde, sencillamente, al punto en que la afinidad del enlace entre el ARNm y el ARNt es más débil; por tal motivo Crick dio a este fenómeno el nombre de "bamboleo". Pero los codones sinónimos —aquellos que codifican el mismo aminoácido— a menudo se diferencian sólo en sus últimas letras, por lo que estas traducciones erróneas acostumbran producir, no obstante, un aminoácido correcto.

A pesar de que este agrupamiento de codones sinónimos reduce de por sí el valor de error del código, la mecánica del bamboleo sugiere que la disposición resulte de una limitación bioquímica con mayor probabilidad que de una adaptación evolutiva. Así pues, por ser mejor pecar de cautos, para deducir nuestra medida nos ceñiríamos a los códigos hipotéticos que compartieran esta propiedad. Por otra parte, era imposible cuantificar la hidrofobicidad de los codones de paro ("stop"); en consecuencia, mantuvimos invariables su número y su significado en todos los códigos hipotéticos.

Tomadas en consideración estas limitaciones técnicas, procedimos a generar códigos hipotéticos distribuyendo aleatoriamente los 20 significados entre los 20 bloques de codones. Pero aun así resultaban posibles todavía unas $2{,}5 \times 10^{18}$ configuraciones (número aproximadamente igual al de segundos transcurridos desde la formación de la Tierra). Para facilitar el manejo de tal cantidad de opciones, las agrupamos en grandes muestras aleatorias. Descubrimos que en una muestra de 1 millón de códigos hipotéticos había sólo un centenar que tuvieran un valor de error menor que el correspondiente al código natural.

Decidimos perfeccionar nuestro algoritmo de generación de códigos. Para que éste simulara mejor las condiciones del "mundo real", añadimos restricciones que reflejaban ciertas pautas observadas en las mutaciones del ADN y en los errores de transcripción en ARN. En estas condiciones "del mundo real", el valor de error del código natural parecía ser todavía inferior en varios órdenes de magnitud, superando en eficacia al millón de hipotéticas variantes, menos a una.

Tan extraordinaria robustez del código genético cabe atribuirla a la selección natural. Es posible que alguna vez hubiera muchos códigos, todos con diferentes grados de proclividad a error. Los organismos cuyos códigos mostrasen mayor capacidad de soportar errores gozarían de mayores probabilidades de sobrevivir; lo ocurrido fue, sencillamente, que el código genético estándar actual venció en la lucha por la existencia. Sabemos que el código admite variantes, por lo que esta hipótesis es razonable.

Las pruebas a favor de la hipótesis de que ha sido la minimización de errores la fuerza motriz evolutiva que subyace bajo la organización del código no carecen de críticos. Refinadas búsquedas informáticas pueden sin duda mejorar las elecciones de la naturaleza, aun cuando sea aceptada la premisa de que un código es "bueno" si minimiza la variación de hidrofobicidad de los aminoácidos provocada por errores genéticos. Pero la optimalidad de los códigos resultantes de predicciones informáticas es mera optimalidad con respecto a los criterios suministrados por el programador, y la mayoría de los códigos "superiores" que han sido descritos hasta la fecha, se basan en presunciones simplistas sobre los tipos de errores a que se expone un código en el mundo real. Tales presunciones no tienen en cuenta, por ejemplo, el efecto de bamboleo, lo que imposibilita que

TAMI J. TOLPA

sus algoritmos perciban la ventaja de que los codones sinónimos se diferencien, de modo exclusivo, en su tercera letra.

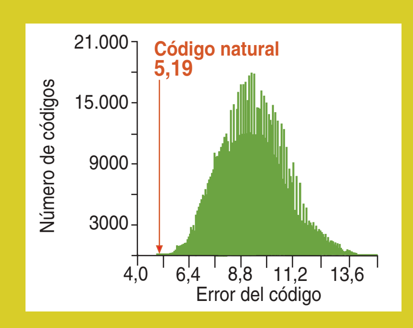
Esta insuficiencia pone de manifiesto un segundo problema asociado a los códigos optimizados por la simulación teórica. La selección natural es un "diseñador ciego": solamente puede tender a un ideal eligiendo, en cada generación, la mejor opción que haya en una población de variantes. Si se opera por esa vía una simulación de la evolución natural, encontramos que el grado de minimización de error conseguido por el código genético estándar sigue todavía siendo bastante impresionante: menos del 3 por ciento de los códigos hipotéticos pueden evolucionar por medio de la selección para llegar a igualar la robustez del código natural.

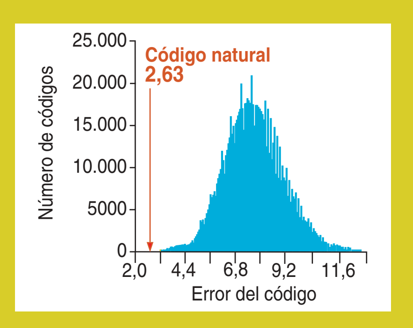
Dicho de otro modo: el código "diamante" y el código "sin comas" parecieron antaño ser superiores al propio código de la naturaleza; cabría incluso generar, por medios informáticos, códigos matemáticamente más idealizados todavía. Pero la mera exhibición de la posibilidad de que existan códigos superiores, sin tener en cuenta el proceso evolutivo, resulta de dudosa relevancia para comprender la solidez de la solución alcanzada por selección natural.

El código genético no sólo es un producto de la selección natural. Podría operar al modo de un algoritmo de exploración que busque acelerar la evolución. Las propiedades del código asociadas a la minimización de impactos, con sus bloques de codones sinónimos y de codones que especifican aminoácidos similares, no se limitan a restringir los daños. A diferencia de lo que sucede con las alteraciones de gran alcance, las micromutaciones tienen, en términos estadísticos, mayores probabilidades de resultar beneficiosas; de ese modo, al minimizar los efectos de una mutación cualquiera, el código maximiza la probabilidad de que una mutación génica conduzca a una mejora en la proteína resultante.

El código, a prueba

Los daños sufridos por las proteínas a resultas de mutaciones génicas, o de errores en la traducción o transcripción quedan minimizados cuando los errores provocan la sustitución de aminoácidos por otros de parecida afinidad por el agua (hidrofobicidad). Si se define el valor de error de un código como la variación media de hidrofobicidad de los aminoácidos provocada por todos los posibles cambios de una sola base en todos los codones de un código, tendremos que un elevado valor de error indicaría que el código es muy vulnerable a los errores, mientras que un valor bajo significaría que tal código minimiza los daños. Los autores han generado una extensa muestra aleatoria de hipotéticos códigos, y han observado que solamente 100 de entre 1 millón de esos códigos posibles mostraban un valor de error inferior al del código de la naturaleza (*izquierda*). Se introdujeron después reglas, tomadas del mundo real, referentes a la forma en que mutan los genes o en que son defectuosamente traducidos: el código de la naturaleza supera a todas, excepto a una, del millón de variantes considerado (*derecha*).





LUCY READING

Utilización del código

La comprensión de las fuerzas que configuraron el código y la forma en que éste, a su vez, moldea el curso de la evolución, no sólo permite admirar la pericia de la naturaleza en cuanto diseñadora de *software*. Ese conocimiento puede contribuir a la solución de los problemas planteados hoy en los laboratorios.

Entre las prioridades en biología molecular destaca la identificación de genes. Se trata de ir cerniendo resmas de secuencias de genoma en bruto hasta descubrir las que definen auténticos genes. Pero las búsquedas en curso se limitan a usar como patrón las propiedades características de los genes conocidos ya. Al tener en cuenta la forma en que el código genético filtra las mutaciones génicas, tales búsquedas podrían resultar potenciadas, pues permitirían reconocer genes sumamente diversificados e, incluso, inferir quizá la función de las proteínas por ellos cifradas. Cabe también la posibilidad de extraer claves sobre el plegamiento de las proteínas —dictado por la disposición de sus aminoácidos—, mediante el análisis de las propiedades de minimización de error de sus codones y el examen de la forma en que sus sustituciones podrían repercutir en el tamaño, carga, o hidrofobicidad de los aminoácidos.

También los biólogos pueden aplicar los conocimientos adquiridos sobre el código estándar para "disfrazar" genes con fines de investigación. La existencia de un código que es universal, o poco menos, para todas las formas de vida ha posibilitado que se convierta en práctica común tomar un gen de interés (un oncogén, por ejemplo) e insertarlo en *Escherischia coli*, que fabricará la proteína correspondiente. Aunque no siempre se logra, porque el organismo receptor no puede expresar el gen, porque produce menos proteína de la esperada o porque sintetiza una proteína ligeramente diferente de la humana.

Este problema, verdadera cruz de la investigación, resulta, en ocasiones, de la dispar preferencia de los organismos por codones sinónimos.

El código en evolución

Existen al menos 16 organismos, pertenecientes a un amplio abanico de linajes evolutivos, que se desvían del código estándar de la naturaleza al asignar “significado aminoacídico” a determinados codones. Por ejemplo, muchas especies de *Acetabularia*, un alga verde, traducen los codones UAG y UAA en el aminoácido glicina, mientras que en el código estándar tales codones son señales de paro (“stop”). Para los hongos *Candida* el codón CUG del ARN especifica serina, cuando por norma determina el aminoácido leucina. La existencia de tales variaciones pone de manifiesto que el código genético ha podido evolucionar, e incluso dar indicaciones de cómo lo hizo.

En los tres dominios de la vida, se fabrica en ocasiones el aminoácido selenocisteína, no perteneciente al cupo de los 20, en respuesta al codón estándar UGA. La selenocisteína se origina por alteración bioquímica de la serina mientras ésta se encuentra todavía aprehendida en su ARN en el ribosoma. En dos dominios (*archaea* y bacterias) existe un vigésimo segundo aminoácido, la pirrolisina, que es producido de igual modo, en respuesta al codón UAG, que en el código estándar indica paro (“stop”).



ACETABULARIA, un alga marina, puede alcanzar una longitud de 5 cm. Cada pedículo está constituido por una sola célula, la mayor que conoce la ciencia.

Es probable que el código utilizado por la vida primitiva no alcanzase a especificar 20 aminoácidos. De hecho, los aminoácidos más complejos derivan de otros más sencillos por modificación bioquímica. Por ejemplo, en varias especies de bacterias el aminoácido glutamina se sintetiza a partir de glutamato, mientras éste se encuentra todavía engarzado a su ARN. Este fenómeno induce a pensar que ciertos aminoácidos recientes pudieran haber aparecido en forma de modificaciones de un conjunto primordial más restringido y que los recién llegados “se apropiaron” de un subconjunto de los ARNt y de codones asignados a sus parientes relativamente más simples; también, ciertos codones parecen haber sido “capturados” por aminoácidos estándar en los organismos que se sabe que emplean códigos variantes. Estos descubrimientos suscitan la cuestión de cuántos códigos variantes más pueden existir en la naturaleza y la de si el código estándar acabará ampliándose y dando cabida a muchos más aminoácidos.

Pensemos, por ejemplo, en el código estándar, que contiene seis codones para el aminoácido arginina: los genes humanos tienden a preferir el uso de los codones AGA y AGG, en tanto que la bacteria *E. coli* sólo muy raramente se vale de AGA y a menudo lo traduce mal. El conocimiento de estas variaciones y preferencias consiente el diseño de versiones del gen humano que funcionarán fiablemente al introducirlas en otros organismos.

Uno de nuestros laboratorios (el de Freeland) está desarrollando aplicaciones informáticas destinadas a facilitar la conversión de las anteriores acotaciones teóricas al código en instrumentos aptos para la ingeniería genética, el rastreo de genes y la predicción del plegamiento de las proteínas. Junto con otros especialistas estamos investigando el camino recorrido hasta la constitución del código, es decir, de qué modo empezó el ARN a interactuar con los aminoácidos, cómo llegó su asociación a desarrollar un sistema formal de codificación, y de qué manera se fue ampliando el alfabeto de aminoácidos durante las primeras fases de la evolución.

Esta metodología podría abrir caminos hacia muchas otras cuestiones pendientes: ¿A qué se debe que haya sólo 20 aminoácidos estándar, ni uno más ni uno menos? ¿Por qué se hallan ciertos aminoácidos en correspondencia con seis codones, mientras que otros lo están con uno o dos? ¿Tendrá esta organización que ver con la minimización de errores? El desciframiento del código ha demostrado ser meramente el principio para comprender su significado.

ALEXIS ROSENFELD *Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.*

Los autores

Stephen J. Freeland y **Laurence D. Hurst** se sirven de la bioinformática para ahondar en la evolutiva biológica. Freeland, profesor de bioinformática en la Universidad de Maryland en Baltimore, se propone convertir sus simulaciones numéricas sobre evolución del código en métodos prácticos para la exploración del genoma. Se doctoró por la Universidad de Cambridge, con una tesis dirigida por Laurence Hurst, en la actualidad profesor de genética evolutiva en la Universidad de Bath. Hurst ha abordado diversos campos asociados a la estructura y evolución de los sistemas genéticos; en particular, el origen evolutivo de la diferenciación sexual, la ordenación de los genes en los cromosomas, la impronta génica y el código genético propiamente dicho.

Bibliografía complementaria

A QUANTITATIVE MEASURE OF ERROR MINIMIZATION IN THE GENETIC CODE. David Haig y Laurence D. Hurst en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 33, n.º 5, págs. 412-417; noviembre de 1991.

THE INVENTION OF THE GENETIC CODE. Brian Hayes en *American Scientist*, vol. 86, n.º 1, págs. 8–14; enero–febrero de 1998.

THE GENETIC CODE IS ONE IN A MILLION. Stephen J. Freeland y Laurence D. Hurst en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 47, n.º 3, págs. 238–248; septiembre de 1998.

THE CASE FOR AN ERROR-MINIMIZING GENETIC CODE. Stephen J. Freeland, Nick Keulmann y Tao Wu en *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, vol. 33, n.º 4–5; págs. 457–477; octubre de 2003.

Alberto Magno, el gran curioso

En los escritos de este naturalista medieval, que abarcaba el saber de su tiempo, emerge una ciencia orientada hacia la experiencia

Birgit Steib y Roland Popp

Hace unos 740 años, Alberto Magno, una de las figuras más ilustres del saber de la baja Edad Media europea, aseveró: "La curiosidad estimula las observaciones científicas". Y la curiosidad acerca del mundo recorre como un hilo conductor todos los pasos de su vida, que transcurrió aproximadamente de 1200 a 1280. Este miembro de la Orden de Predicadores, luego obispo de Ratisbona, no fue sólo teólogo y filósofo, sino también experto en una serie de disciplinas que constituyen hoy ciencias naturales independientes. El hombre, los animales, las plantas y la materia inanimada, todos los fenómenos naturales, grandes y pequeños, despertaron su interés. Se preguntó acerca de la forma tanto de la Tierra como de una gota de lluvia. El buche melario de la abeja no le fascinó menos que la percepción sensorial humana.

Este abanico de intereses tan amplio asombra desde nuestra perspectiva actual. Para Alberto Magno esta interdisciplinariedad era, precisamente, una condición previa del conocimiento global. Al fin y al cabo, deseaba adquirir nada menos que el saber completo de su tiempo y exponerlo en sus tratados de manera comprensible. El "doctor universal", como se le llamaría más tarde, conocía la literatura especializada antigua y contemporánea. Su empeño en no limitarse a la exposición y comentario del saber transmitido, su deseo de contrastarlo y completarlo con observaciones y experimentos propios, dan testimonio de un afán investigador que produce una impresión de modernidad.

Viajero incansable

La obra completa de Alberto, que ya en vida recibió el sobrenombre de "Magno" ("el Grande"), causa maravilla aunque sólo sea por su mero volumen. Los más de setenta libros y tratados que dejó manuscritos llenarían más de 22.000 páginas impresas. Alberto Magno escribió sobre mineralogía, botánica y zoología, sobre cosmografía y meteorología, sobre fisiología y psicología. En algunos campos de la ciencia, sus trabajos abrieron nuevas vías. Así, por ejemplo, fue él quien compuso la primera exposición detallada de la flora de Europa Central. Desbrozó también el camino de la geografía moderna. Su obra de petrografía constituyó el primer intento de desarrollar una sistemática completa de los minerales.

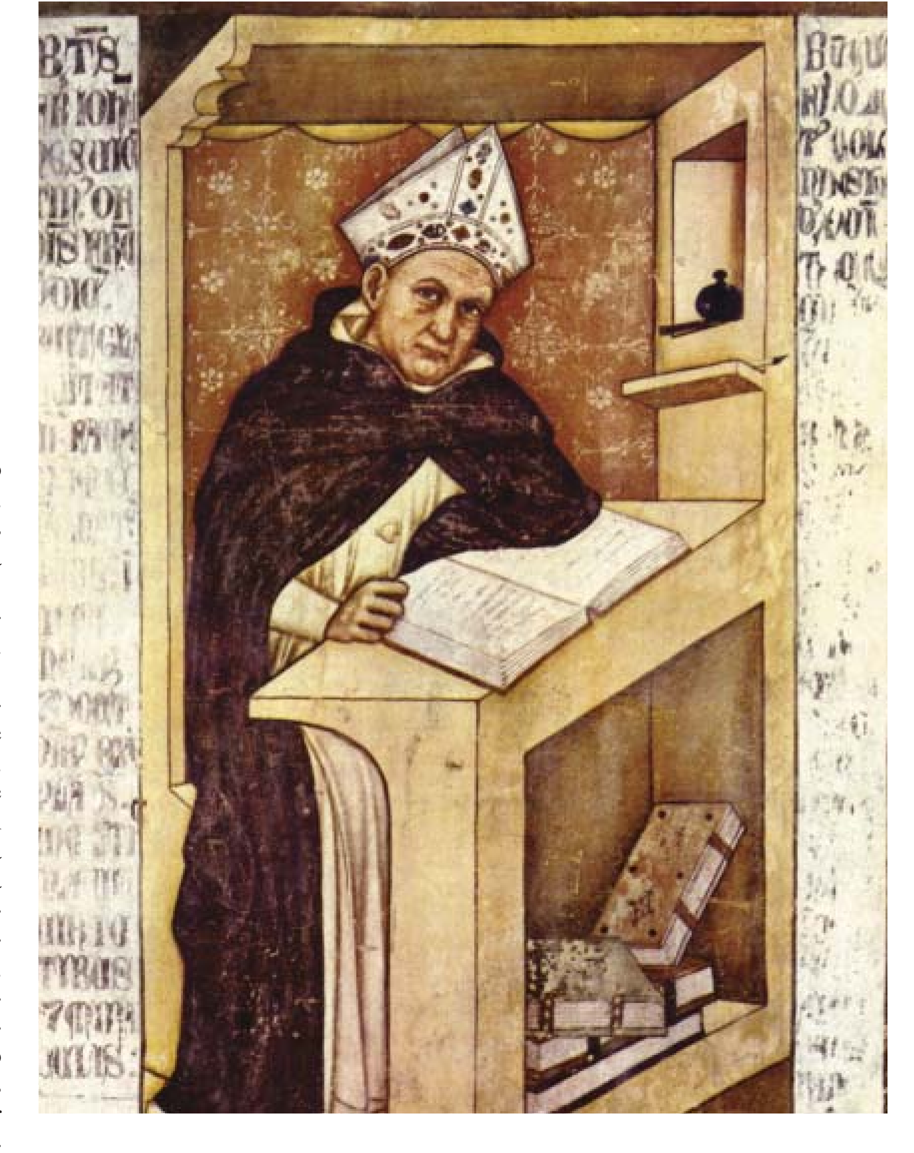
La vida de Alberto Magno fue tan compleja como sus intereses científicos. Ningún alemán había obtenido antes una cátedra en París, en la universidad de mayor prestigio de su época. En Colonia participó en la fundación de la primera universidad en tierras germanohablantes. Y no sólo en el ámbito académico logró gran consideración: fue elegido por los dominicos superior de la provincia alemana de la Orden y se le nombraría obispo imperial. Actuó con frecuencia como árbitro y mediador en querellas o desavenencias.

Hasta una edad avanzada, Alberto Magno conservó su dinamismo, y no sólo espiritual. Roma, Riga, París, Amberes o Basilea: a lo largo de su vida recorrió toda Europa Central. Y de acuerdo con las estrictas reglas de su orden mendicante, realizó todos los viajes a pie.

En sus andanzas, además de tener la oportunidad de observar la naturaleza, pudo consultar las más diversas bibliotecas. Su conocimiento de la bibliografía era pasmoso, aunque las obras pertinentes se hallasen desperdigadas por lugares muy distantes. En su libro de mineralogía, manifiesta su orgullo por haberse procurado bibliografía "de todo el mundo, con el mayor esmero". Puesto que redactó algunas de sus obras en épocas revueltas de su vida, tuvo que retener muchas de las fuentes en la memoria.

Situado en la tradición de la escolástica del siglo XIII, Alberto Magno tomaba como referencia a las autoridades reconocidas y a los autores más difundidos en

1. NO SABEMOS qué aspecto tenía realmente Alberto Magno. El retrato más antiguo se encuentra en un fresco del año 1352, en Treviso (Italia). Lo presenta como dominico, obispo y hombre dedicado al estudio. Generalmente aparece con hábito dominicano a la vez que con la mitra de obispo.



FRESCO DE TOMMASO DA MODENA, 1352; ANTIGUO CONVENTO DE LOS DOMINICOS DE TREVISO, ITALIA

la erudición de su tiempo, como san Agustín, Aristóteles, Hipócrates, Galeno, Séneca o Plinio. Pero sus conocimientos iban mucho más allá de esto.

Así, también citaba un gran número de escritores menos conocidos, e incluso autores árabes y judíos. Alberto fue el primer estudioso occidental que abordó íntegramente los escritos de Moisés Maimónides, el más importante filósofo judío de la religión en la Edad Media. En numerosas cuestiones se remitió a Averroes, el célebre comentarista de Aristóteles de la España musulmana. Y especialmente en sus exposiciones de medicina, anatomía, fisiología y observación de la naturaleza, tuvo en cuenta los conocimientos del médico y filósofo Avicena, así como de muchos otros médicos del Islam. Hay que decir que Alberto Magno tenía que recurrir siempre a traducciones latinas, ya que no sabía griego ni árabe. Pero, con todo, sus fuentes son tan variadas, que casi resulta imposible reconstruirlas íntegramente.

Un instituto de investigación, el Albertus Magnus de Bonn, lleva trabajando desde 1931 en la edición crítica de la obra completa de Alberto Magno. Esa *Editio Coloniensis* comprenderá, según lo proyectado, unos setenta volúmenes, de los cuales han aparecido hasta ahora veinticuatro.

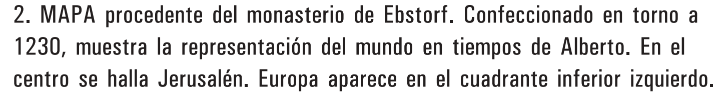
El reto de Aristóteles

La principal querencia científica de Alberto Magno era, sin vuelta de hoja, Aristóteles. “La verdadera filosofía ha de contar con Aristóteles”, decía programáticamente, y con ello asumía un proyecto gigantesco: el de comentar y hacer comprensible a sus contemporáneos la obra entera de Aristóteles. Con la realización de este propósito, Alberto Magno hizo una aportación decisiva a la apertura, por medio de las nociones aristotélicas, de la imagen del mundo cerrada acuñada por san Agustín y Platón. Intentó unificar la filosofía de Aristóteles, racional, intramundana y fundada en causas naturales, con la imagen del mundo cristiana. Ni que decir tiene, Aristóteles ya era conocido antes en Occidente, pero Alberto Magno propició su irrupción decisiva e inició con ello una revolución espiritual histórica.

Algunos teólogos contemporáneos desconfiaron, sin embargo, de ese estudio intensivo de la filosofía antigua, pues estaba ligada a un uso inflexible de la razón. Alberto se quejaba de que los incapaces a causa de la pereza pretendiesen desacreditar a quienes les aventajaban científicamente. El paralelo que trazó con personalidades históricas nos deja entrever a qué incesantes críticas debió de estar sometido: “Gentes así mataron a Sócrates, expulsaron a Platón de Atenas, tramaron contra Aristóteles y le obligaron al exilio. Esa clase de hombres son, en la comunidad de los sabios, lo que el hígado en el cuerpo: así como la hiel que mana amarga todo el cuerpo, así hay también en la vida científica hombres sobremanera amargos y biliosos, que amargan la vida de los demás y no dejan que, en beneficiosa colaboración, se busque la verdad”.

Más tarde se tildó a Alberto Magno de “mono de imitación de Aristóteles”, que aceptaba con credulidad, como si tuvieran una autoridad incontestable, todas las opiniones de éste. Pero Alberto Magno mismo advirtió tajantemente que a Aristóteles había que considerarlo un hombre falible. Juzgaba la fiabilidad de sus fuentes en consonancia con la materia: “En cuestiones de fe y de costumbres, hay que confiar más en Agustín que en los filósofos. Pero si habla de medicina, daría más fe a Galeno o a Hipócrates. Y si se refiriera a las ciencias naturales, creería más a





2. MAPA procedente del monasterio de Ebstorf. Confeccionado en torno a 1230, muestra la representación del mundo en tiempos de Alberto. En el centro se halla Jerusalén. Europa aparece en el cuadrante inferior izquierdo.



3. ESTA ILUSTRACION DEL SIGLO XV representa el universo junto al sabio Alberto Magno. En la inscripción se le alaba como "docto por encima de toda medida".

MUSEUM FUR DAS FURSTENTUM LUNEBURG (*izquierda*); MS. MIII 36; BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD DE SALZBURGO (*derecha*)

Aristóteles o a algún otro especialista de la ciencia natural".

La búsqueda de las causas naturales

En sus escritos sobre ciencias naturales, Alberto Magno solía partir del catálogo de las ciencias aristotélico. Mas para los minerales no había ninguna obra griega en que basarse. Así pues, tuvo que concebir por su cuenta la mayor parte del tratado petrológico *De mineralibus.* Hoy, se lo considera una obra pionera de la mineralogía. Junto a la enumeración y descripción de las distintas piedras preciosas, metales y sales minerales, Alberto Magno se ocupa especialmente de la naturaleza de las rocas, de su formación y su composición. Para ello se basa en la concepción aristotélica de los cuatro elementos, agua, tierra, fuego y aire. A modo de fuerzas elementales, ésas son las piezas con que se construye la naturaleza y que determinan las propiedades de todos los cuerpos. Así, el agua y la tierra tienden a moverse hacia abajo, mientras que el fuego y el aire se desplazan hacia arriba. Alberto Magno aplicó la antigua doctrina de los cuatro elementos en todos los ámbitos de la ciencia natural. Partiendo de esta teoría, entonces en uso, argumentaba de manera racional y causal. Así, en el *De mineralibus,* explicaba: "La tarea de la ciencia natural no consiste en aceptar simplemente cosas relatadas, sino en investigar las causas de los sucesos naturales".

Según la exposición de Alberto Magno, las rocas constan sobre todo de tierra, el más pesado de los elementos, y por ello se hunden en el agua. De las excepciones, como la piedra pómez, que flota en el agua, da una explicación experimentalmente comprobable: en la piedra pómez hay aire encerrado, que la sostiene; pero si se la muele, la arena resultante se hunde en el agua.

Alberto Magno hizo un experimento con cristal de roca: "Si en un interior lo sostenemos ante nosotros de modo que esté en parte a la luz del sol y en parte a la sombra, lanzará sobre la pared un bello arco iris... por eso se lo denomina iris". En analogía con el arco iris celeste, consideró que la causa del juego de colores eran partículas de agua presentes en el cristal.

En su obra meteorológica *Meteora* refiere Alberto Magno cómo observó en el año 1240 junto con muchos otros "un cometa casi en el polo norte". Su concepto de meteorología, conforme al modelo aristotélico, era muy amplio: la consideración de lo producido en las alturas o formado en el aire. De acuerdo con ello, en su *Meteora* Alberto abordaba los cometas y fenómenos ígneos; también se ocupaba de los vientos, truenos y fenómenos típicamente meteorológicos, como la niebla, las nubes o la lluvia. Por ejemplo, examina con detalle la causa y el lugar de formación de la lluvia, así como la redondez de las gotas, que cree fundada en el peso del elemento agua. *Meteora* habla incluso de los terremotos, del vulcanismo, de la formación de los océanos y de los procesos de putrefacción, en todo lo cual Alberto Magno introduce experiencias propias. Así, en el invierno de 1222-1223 vivió un terre-

moto en Lombardía, y en Padua observó cómo un hombre moría mientras limpiaba el fondo de un pozo inutilizado. Aquí aduce vapores corruptos como causa natural del suceso.

De la disciplina que hoy llamamos geografía, a Alberto Magno, seguramente por razón de su propia actividad viajera, le interesaba sobremanera el conocimiento exacto de los emplazamientos. Los mapamundis usuales de su tiempo apenas ofrecían informaciones geográficas exactas. Eran más bien simbólicas; representaban el mundo y su historia de salvación. Asimismo, los itinerarios medievales, como los que ayudaban a los peregrinos, no eran mapas geográficos en sentido moderno, sino descripciones toscas del camino, que enumeraban las estaciones importantes. Para facilitar la planificación del viaje, en estos itinerarios se solían indicar las distancias en jornadas.

Mapas "orientados"

Sin embargo, Alberto Magno empezó a considerar la geografía como una ciencia rigurosa. Con vehemencia subrayó en su obra *De natura loci* el significado de las informaciones geográficas exactas: "No hay ciencia alguna sin el conocimiento exacto de los lugares geográficos, de sus diferencias y de las causas de ello; los que no se preguntan por estas cosas, cometen un grave error."

En consecuencia, Alberto Magno se ocupó de la forma y tamaño de la Tierra, así como de su superficie y del clima de las distintas regiones del mundo. En su obra geográfica, que apareció hacia 1250, confeccionó un bosquejo de la tierra habitable conocida. Coherente con lo usual entonces, su representación no está encarada al norte como hoy en día, sino hacia oriente: está "orientada".

Siguiendo la antigua teoría de las zonas climáticas, Alberto Magno dividió la tierra habitable en diversos climas. Expuso que las características de los lugares geográficos venían determinadas no sólo por su situación, sino también por las aguas, los bosques y las montañas o por la reflexión de los rayos solares. Refiriéndose a las regiones de 56º de latitud norte (lo que corresponde más o menos a la altura de Copenhague), advirtió que en invierno hacía tanto frío, que no cabía alejarse de la estufa sin poner la vida en peligro. El primer clima, para Alberto Magno, empezaba en el ecuador. A pesar de que los autores antiguos consideraban esta región inhabitable debido al calor extremo, él sospechó que en el hemisferio sur de la Tierra vivían también seres humanos.

La Tierra esférica

Aunque contraste con la imagen tan corriente de la "atrasada" Edad Media, a Alberto Magno, como a cualquier persona culta del siglo XIII, no le cabían dudas de que la Tierra no era un disco, sino una esfera. Alberto se apoyaba principalmente en Aristóteles y aducía una serie de razones en favor de la forma esférica: debido a ella, en Oriente se observan los ortos y ocasos de las estrellas antes que en Occidente. En los viajes hacia el sur se hacen visibles nuevas constelaciones; pero cuanto más al norte se encuentra uno, más estrellas permanecen constantemente sobre el horizonte. Y cuando en barco nos acercamos a la costa, debido a la superficie curvada del agua se ven primero las cimas de los montes y sólo después la línea de la costa. Otro argumento lo proporcionan las observaciones de un eclipse de luna: la sombra siempre redondeada que la Tierra proyecta sobre la Luna sólo se puede explicar por su figura esférica.

En la Edad Media se debatía si podían vivir seres humanos más allá de la parte conocida de la Tierra. A pesar de que el doctor de la Iglesia san Agustín había negado la existencia de tales "antípodas" (literalmente: "los opuestos por los pies"), Alberto Magno defendía la habitabilidad del hemisferio austral. Según decía él, "debajo" es un concepto relativo: "Aunque no ha venido hasta nosotros ningún habitante del hemisfe-

Biografía breve de Alberto Magno

hacia 1200	Nace en Lauingen an der Donau
1223	Estudiante de artes liberales en Padua; ingreso en la Orden de Predicadores (dominicos)
después de 1223	Estudios de teología y ordenación sacerdotal en Colonia
hacia 1228-1240	Lector en varios conventos dominicos
hacia 1240	Va a la Universidad de París, donde consigue el título de Maestro en teología en 1245 y a continuación enseña durante tres años; dedicación intensiva a Aristóteles y a las filosofías judía y árabe.
1248	Vuelta a Colonia, acompañado de su discípulo Tomás de Aquino; rector del nuevo *studium generale* allí fundado, primera escuela superior de la Orden de Predicadores en Alemania
1252	Hace de mediador en un pleito entre el arzobispo de Colonia y los ciudadanos de dicha urbe ("pequeño arbitraje")
1254-57	Provincial (superior) de la provincia dominicana alemana; largos viajes dentro y fuera de Alemania
1258	Nueva mediación entre el obispo y la burguesía de Colonia ("magno arbitraje")
1260-1262	Obispo de Ratisbona; saneamiento de la diócesis
1263-1264	Viaja por Alemania y Bohemia como predicador de la cruzada
después de 1264	Docencia en Würzburg y Estrasburgo
1269/1270	Vuelta definitiva al convento dominico de la Santa Cruz en Colonia
1280	El 15 de noviembre muere en Colonia
1931	Canonización y nombramiento de doctor de la Iglesia
1941	Es nombrado patrono de los naturalistas

MUSEO DIOCESANO DE RATISBONA



4. ALBERTO MAGNO viajó por casi toda Europa central a pie. Visitó los lugares marcados en rojo entre septiembre de 1254 y septiembre de 1256. Durante ese tiempo, como superior de la provincia alemana de su orden, estuvo de camino casi sin descanso.

rio inferior, ello no permite deducir que no viva nadie en ese lugar, pues la inmensidad del océano que rodea aquellas tierras simplemente no permite cruzarlas a vela... No hay que prestar atención alguna a quienes se imaginan que los hombres no pueden habitar esas zonas porque se caerían de la Tierra. Afirmar que se podrían caer los que habitan la cara antípoda, es decir, los que tienen los pies opuestos a los nuestros, sólo puede ser efecto de la ignorancia de los simples. La parte inferior de la Tierra no debe ser considerada con respecto a nosotros, sino de manera absoluta. Lo que está debajo en sentido absoluto, o sea, lo que desde todas partes puede llamarse debajo, es el centro de la Tierra".

La idea de que toda materia tendía hacia el centro del mundo le servía también a Alberto Magno para explicar la esfericidad de la Tierra. Su razonamiento vuelve a basarse en la doctrina de los cuatro elementos: los dos elementos pesados, tierra y agua, son atraídos hacia el centro del universo. Al aglomerarse estrechamente en su intento de alcanzarlo, dice Alberto Magno, establecen necesariamente la esfericidad de la Tierra.

Conocedor de la fauna local

Igual que los escritos cosmográficos de Alberto Magno, su obra zoológica *De animalibus* se ha conservado también en su manuscrito original. Hace pocos años que apareció en Baltimore (Maryland) la primera traducción del latín completa y comentada de esta obra; ocupa más de 1700 páginas. La exhaustiva ciencia zoológica de Alberto Magno abarca desde los insectos y arañas hasta los peces y hombre pasando por otros muchos intermedios. Muy netamente se separa el *De animalibus* de los libros de animales moralizantes y alegóricos tan difundidos en el medievo, los denominados bestiarios. Alberto Magno, por el contrario, se proponía describir todas las diferencias conocidas de los animales en cuanto a cuerpo, reproducción, nutrición y comportamiento, así como exponer las causas naturales de tal multiplicidad. Con el relato detallado de sus propias experiencias, conocimientos y vivencias, Alberto Magno se nos muestra como un conocedor riguroso de la fauna local.

El fraile predicador aprovechó al parecer sus frecuentes viajes para interrogar también a campesinos, pescadores y cazadores. Las informaciones que le parecían fabulosas, las ponía en duda —independientemente de si procedían del pueblo llano o de autoridades reputadas—. Criticaba con decisión las afirmaciones que a sus ojos contradecían a la razón. Así, consideró ilógica la aserción del escritor romano Plinio de que existía una especie de garza, de nombre "monoculus", con un solo ojo: "Parece que lo que dice es falso y contradice a la naturaleza. Pues así como a ambos lados crecen dos alas y dos pies, así sucede también con los ojos. No tendría sentido que se formara un ojo solamente en un lado y no en el otro. Este Plinio dice muchas cosas que no están atinadas en absoluto...".

Algunas noticias las rechazó porque no coincidían con sus propias observaciones. Rebatió la opinión de que los buitres no copulaban y de que nadie jamás había visto sus nidos, ya que él sabía de buitres que empollaban en los montes entre Worms y Tréveris. También se los podía observar allí con frecuencia durante el apareamiento.

Hormigas león y martines pescadores

A una narración del *Physiologus,* un libro de animales paleocristiano entonces muy difundido e influyente, según la cual la hormiga león era medio hormiga y medio león y por esa doble naturaleza no podía tomar alimento, Alberto Magno opuso lo siguiente: "La he observado mu-

chas veces y he mostrado a mis compañeros que este animal tiene el aspecto de una garrapata y que se oculta en la arena, donde excava una depresión semicircular, en cuyo polo se halla la boca de la hormiga león. Cuando pasan las hormigas en su búsqueda de alimento, las atrapa y devora. Esto lo hemos visto muchas veces".

Alberto Magno no tenía reparos en comprobar personalmente noticias que hoy sólo nos hacen sonreír. En su descripción del martín pescador notó lo que sigue: "Se dice de este pájaro que cambia las plumas incluso si es despellejado y se cuelga su plumaje en una pared. Yo he comprobado con unos cuantos de ellos que esto no es verdad".

Alberto Magno concedió un gran valor a la experiencia y a la observación sistemática, "objetiva". Escribió al respecto: "Es necesario mucho tiempo para comprobar que en una observación se ha excluido todo engaño... No basta disponer la observación sólo de una manera determinada. Por el contrario, hay que repetirla en las más diversas condiciones, para que aparezca con seguridad la verdadera causa del fenómeno".

De acuerdo con esto, en la obra de Alberto Magno queda constancia de experimentos propios. A una hormiga le arrancó las antenas para averiguar si los insectos tenían los ojos en ellas. Y respecto de la abeja, señaló: "He investigado la anatomía de las abejas en las diversas secciones de su cuerpo. Así, en el abdomen, que sigue a su cintura, se halla una vejiga clara. Si la abrimos y la probamos, veremos que contiene un líquido que sabe a miel finísima". Es notable este método de dilucidar relaciones anatómicas mediante el gusto. Ya que faltaban todavía más de 350 años para la invención de la microscopia, en aquellos tiempos sólo se podían reconocer las estructuras perceptibles a simple vista.

A pesar de estas limitaciones metódicas, Alberto Magno fue el primero en dar a conocer que el sistema nervioso de los articulados se parece a una escalera de cuerda situada en posición ventral: "Sobre el lado del vientre, en los cangrejos hay un puente por el que pasa el órgano que transmite la fuerza motriz desde el cerebro". La interpretación racional del acontecer natural, su observación rigurosa y sistemática, sus experimentos, hacen de Alberto Magno un precursor de las ciencias naturales modernas.

Sobre el hombre

En sus disertaciones acerca de las diferencias y similitudes entre los seres vivos, daba por sentado que debía incluirse al hombre. De acuerdo con esto, en su zoología expuso también la anatomía, la fisiología e incluso el comportamiento humanos. Además, compiló una serie de libros de psicología. Entre otras cosas, escribió de los sentidos y la percepción sensible, de la memoria y el recuerdo, del espíritu vital y la respiración, de los sueños, la vigilia y el dormir.

Es importante su comentario a la teoría del alma de Aristóteles (*De anima*). Tomó este escrito aristotélico como fundamento, lo completó con afirmaciones de eruditos musulmanes, así Alfarabi, Avicena o Averroes, y a ello añadió todavía desarrollos y observaciones propias. Del mismo modo procedió en sus tres libros sobre "el sueño y la vigilia" (*De somno et vigilia*). El sueño era para Alberto Magno una "traba de los sentidos y del movimiento". El dormir, según él, es necesario para que el "spiritus sensibilis" —según la concepción antigua, una materia muy sutil en los ventrículos cerebrales que intervenía en las percepciones sensibles— pueda recogerse en el interior del cuerpo para su recuperación regular. Al recogerse, se bloquearía la capacidad de percepción y la motricidad voluntaria. Al invertirse la dirección del flujo del "spiritus", se producirían los sueños.

Si los animales también duermen y sueñan como los hombres, es algo que en la Edad Media no se tenía muy claro. Alberto Magno tomó posición de forma inequívoca: "Para decirlo brevemente: todos los animales velan y duermen. El animal que tenga párpados, los cerrará durante el sueño. Que muchos animales, y no sólo el hombre, sueñan, está claro, ya que gritan durante el sueño. Vale esto para el caballo, el toro, la cabra, el perro y muchos otros cuadrúpedos que nacen vivos del cuerpo materno. Los perros a veces ladran durante el sueño, y muchos otros cuadrúpedos hacen algo semejante. De que los peces duermen no cabe dudar, ya que se pescan muchos cuando les vence el sueño".

Sueños y sonambulismo

Según Alberto Magno, temores y deseos determinan los sueños. El hambre nos hace soñar con comida y la concupiscencia induce sueños de contenido sexual que pueden llegar hasta la experiencia del orgasmo. Escribió también sobre la interpretación de los sueños y sobre las profecías que podría contener. He aquí su parecer: "No se puede negar que a veces los sueños significan algo. ¿Quién no ha tenido sueños que luego se han realizado? Pero por otra parte, nunca son de fiar del todo".

Alberto Magno sabía que raramente soñamos olores. Lo explicó por la debilidad general de la capacidad olfativa humana. Y a pesar de que los resultados recientes de la investigación sobre la percepción olfativa muestran que Alberto Magno subestimó claramente el sentido del olfato humano, un estudio llevado a cabo entre europeos sobre el comportamiento durante el sueño (el llamado Proyecto Siesta) confirma su sospecha: los sujetos, en efecto, casi nunca refieren experiencias de sueño "olorosas".

Al fenómeno del sonambulismo dedicó Alberto Magno un capítulo específico: "Aun cuando el sueño traba los sentidos y los movimientos, hay que saber que, con todo, ciertos hombres sí se mueven y realizan actividades durmiendo, igual que si estuvieran despiertos. Por ejemplo, pueden andar dormidos, o cabalgar, o buscar algo, o perseguir enemigos e incluso quizá matarlos, y luego, dormidos sin duda, se vuelven a la cama". Esta descripción del sonambulismo puede sonar desencaminada a primera vista, pero en la moderna bibliografía médica sobre el sueño, junto a los conocidos modos de comportamiento automático, hay referencias a casos raros en que se han cometido acciones agresivas durante episodios de sonambulismo. Muchas de las observaciones de Alberto Magno son, pues,



INSTITUTO BOTANICO DE BARCELONA

5. DE FRECUENTAR TANTO los caminos, Alberto Magno conocía bien la achicoria (*Cichorium intybus*): "Es una hierba que crece densamente junto a los caminos, en suelos firmes y batidos; su tallo es duro, pero no leñoso, carece de hojas anchas y le salen flores de un azul intenso o como el del jacinto, que se abren al salir el Sol y se cierran cuando se pone, como tantas otras flores".

enteramente correctas al nivel fenomenológico, mientras que los intentos de explicación fisiológica responden al estado de los conocimientos de aquel tiempo y están ampliamente superados. De todos modos, es innegable que en los escritos fisiológicos de Alberto Magno hay una manera de tratar el sueño y la vigilia profundamente "científica".

El botánico

Sobre todo en los siete libros *De vegetabilibus*, Alberto Magno ofrece una multitud de indicaciones de carácter medicinal. Recomendaba tomar frutos de peonía con hidromiel como remedio contra las pesadillas nocturnas. Su ciencia terapéutica se apoyaba en la antigua doctrina de los cuatro "humores": sangre, flema, bilis amarilla y bilis negra. Se les atribuían propiedades y temperamentos específicos. Una mezcla correcta de esas cuatro sustancias, según la concepción de entonces, significaba equilibrio anímico y salud corporal, mientras que un desequilibrio de los humores conllevaba la enfermedad. Las plantas medicinales debían contribuir, con sus cualidades "cálida", "fría", "seca" o "húmeda", a devolver a los humores su recto equilibrio. Aunque Alberto Magno hace referencia a las propiedades y usos medicinales de las plantas, su botánica se diferencia de las corrientes en su tiempo, orientadas a lo medicinal.

Alberto Magno subrayaba que su tratado sobre las plantas era "distinto al de un médico". Su interés por las plantas en sí mismas no tiene apenas paralelo en su época. En su *De vegetabilibus* ocupa un amplio espacio la botánica general. Escribe de la naturaleza de las plantas, sus condiciones y formas de crecimiento, el aspecto y estructura de las hojas, las flores, las semillas y los frutos. Trata de su forma, color, olor y sabor. Describe uno por uno alrededor de 390 árboles y hierbas. Además, expone cómo se cultivan campos y viñedos, huertos y jardines.

Son notables algunas de sus reflexiones morfológicas. Por ejemplo, distingue con precisión entre espinas y aguijones, una distinción que todavía hoy es válida en botánica. Reconoce las tijeretas de la vid como foliáceas. Puesto que siempre se oponen a una hoja, igual que los sarmientos, sospecha que podrían ser "racimos no desarrollados". Con tales exposiciones minuciosas de la flora centroeuropea, Alberto Magno se convirtió en un botánico cuyas aportaciones no fueron superadas durante siglos.

En las obras de ciencia natural de Alberto Magno, muchas descripciones detalladas de la cultura cotidiana y la técnica medievales permiten apreciar que sentía un vivo interés por las cosas prácticas de la vida. Al tratar del pino en sus exposiciones botánicas, describe cómo se construye un doble horno para la obtención de alquitrán de madera. Y en el apartado dedicado al roble no sólo escribe sobre el aspecto del árbol, sino también sobre la elaboración de tinta negra con agallas de roble y hierro. En el *De animalibus* recomienda fabricar las suelas de zapatos con cuero de asno, ya que lo considera especialmente robusto y resistente. Aunque con el tiempo, advierte, el cuero se vuelve tan correoso, que al fin los pies no lo soportan.

Toda una vida en el camino

El interés naturalista de Alberto Magno se despertó sin duda ya en sus años mozos. Un indicio de ello lo suministra la descripción de una cacería con halcones en el *De animalibus,* que introduce con estas palabras: "Cuando yo era joven todavía y fui de cacería con los perros perdigueros...". Alberto Magno, que había nacido hacia 1200 en Lauingen an der Donau, estaba familiarizado también con la flora y la fauna de su río natal. Así, por ejemplo, menciona que observaba los peces desde su casa. Más o menos a los veinte años de edad, "Alberto de Lauingen" abandonó su patria suaba para estudiar artes liberales en la Universidad de Padua. Por aquel entonces aún no había ninguna universidad en territorio de lengua alemana. Ya en esto se revela el espíritu pionero de Alberto: la Universidad de Padua había sido fundada en 1222. En esta ciudad italiana ingresó en los dominicos, una orden mendicante aún muy joven que desde el principio concedió gran importancia a la formación y a la actividad intelectual.

El resto de la vida del fraile mendicante estuvo marcado por largos viajes que siempre realizó a pie, de acuerdo con las reglas de su orden. Primero se trasladó a Colonia para su formación teológica. Después enseñó él mismo durante unos diez años en varias escuelas monacales alemanas, entre ellas las de Ratisbona, Hildesheim, Friburgo y Estrasburgo. Hacia 1240, para proseguir su formación, marchó a París, donde se hallaba la universidad más prestigiosa y célebre de su tiempo. Allí consiguió, como primer domi-

nico de habla alemana, el título de *magister* y ocupó una cátedra. Empezó a ganarse una excelente reputación como teólogo, filósofo y naturalista. En París adquirió el saber y la consideración que, a él sólo entre todos los sabios de la historia, le merecería el sobrenombre de "Magno", por lo demás reservado a monarcas. Uno de sus discípulos fue Tomás de Aquino. Con él se volvió Alberto a finales del decenio de 1240 a Colonia, para organizar allí un "studium generale". Se tiene a esta escuela superior dominica por la primera universidad alemana y la predecesora de la Universidad de Colonia.

Arbitraje de crisis

Alberto Magno nunca se concibió a sí mismo como un erudito en una torre de marfil. Lo prueba su amplio compromiso pastoral y social. Demostró su capacidad como administrador en situaciones de crisis en Ratisbona, donde asumió el ministerio episcopal con el nombre de Alberto II en 1260. Al cabo de pocos meses consiguió arreglar el estado desolador y miseria financiera del obispado. Pero Alberto Magno sólo se mantuvo en el cargo de obispo imperial de Ratisbona durante dos años: una vez que hubo puesto orden en la diócesis, se retiró.

No sólo tenía talento organizador, sino también una capacidad muy notable como hombre bueno. De él nos han llegado 25 arbitrajes y mediaciones. Abarcan problemas muy diversos: derechos de entierro o patronazgo, acuñaciones, diezmos. Defendió a la orden mendicante en la curia papal de los ataques del clero secular. La intervención más célebre fue su mediación entre la irritada burguesía de Colonia y el señor de la ciudad, el arzobispo. El juicio arbitral que Alberto Magno emitió en 1258 para ese caso pasó a la historia con el nombre de "magno arbitraje". Hasta hoy, se considera a este instrumento como el primer documento de la constitución de Colonia.

La fama de Alberto se extendió ya en vida suya. "Mi maestro, el señor Alberto", es "verdaderamente una maravilla de nuestro tiempo, que causa asombro". Con estas palabras lo alababa su discípulo Ulrico de Estrasburgo. También es verdad que corría mucho la voz de que era un mago y un hechicero (*magnus in magia*). Su importancia como científico no fue plenamente ponderada hasta el siglo XX. En 1941 se le nombraría patrono, intercesor y modelo de los naturalistas.

Todavía hoy, el saber universal y el carácter polifacético de Alberto Magno, su anhelo investigador en todos los campos y su inmensa curiosidad acerca del mundo producen fascinación. "Desear el saber por el saber" era para él "una ocupación seria y no una frívola osadía". Esta incansable búsqueda del conocimiento lo convirtió en un experto en muchos campos y conformó una interdisciplinariedad a la que ya no podemos aspirar en semejante medida. Adoptó una actitud crítica ante las autoridades de las diversas disciplinas particulares. Su confianza en la razón, su empeño en investigar las causas físicas de los procesos de la naturaleza y su insistencia en la importancia de la observación y la experiencia nos llevan a ver a este genio universal de la Edad Media como un precursor de las modernas ciencias naturales.

Los autores

Birgit Steib, licenciada en biología, está especializada en ecología. **Roland Popp** es psicólogo y somnólogo del Centro de Medicina del Sueño de la Universidad de Ratisbona. Dirigen la agencia "Wissensräume" ("Espacios del saber"), que diseñó una exposición sobre Alberto Magno en Ratisbona.

Bibliografía complementaria

DIE WAHRNEHMUNGSPSYCHOLOGIE UND SINNESPHYSIOLOGIE DES ALBERTUS MAGNUS. Peter Theiss. Lang; Frankfurt am Main, 1997.

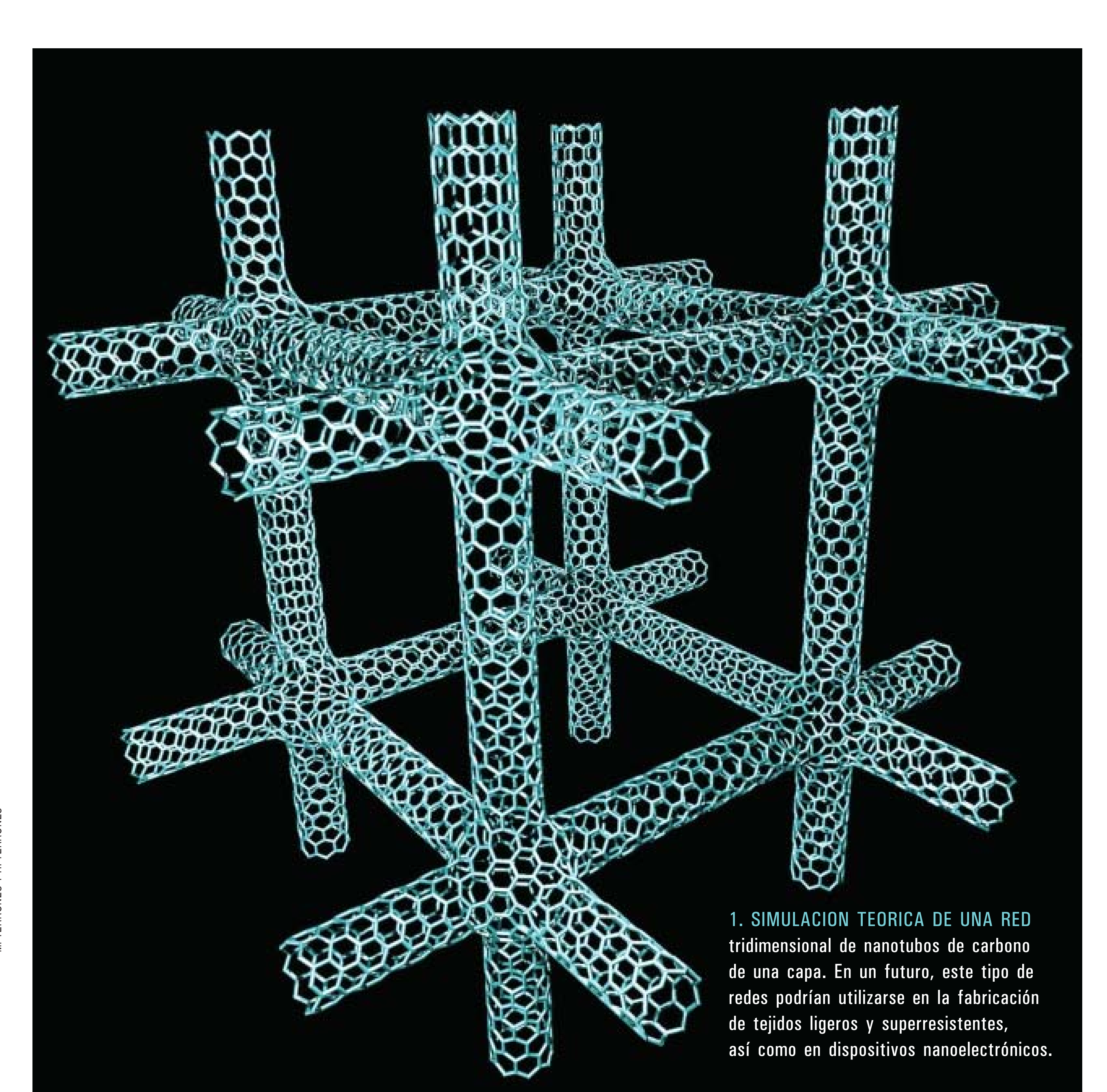
ALBERTUS MAGNUS. ON ANIMALS: A MEDIEVAL SUMMA ZOOLOGICA. Traducción y comentarios de Kenneth F. Kitchell, Jr. e Irven M. Resnick. Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1999.

ALBERTUS MAGNUS. Dirigido por Walter Senner. Akademie Verlag, Berlín, 2001.

Nanotubos de carbono

La versatilidad del carbono le ha permitido adoptar nuevas estructuras nanométricas con propiedades físicas y químicas que abren un horizonte inmenso de aplicaciones

Mauricio Terrones y Humberto Terrones

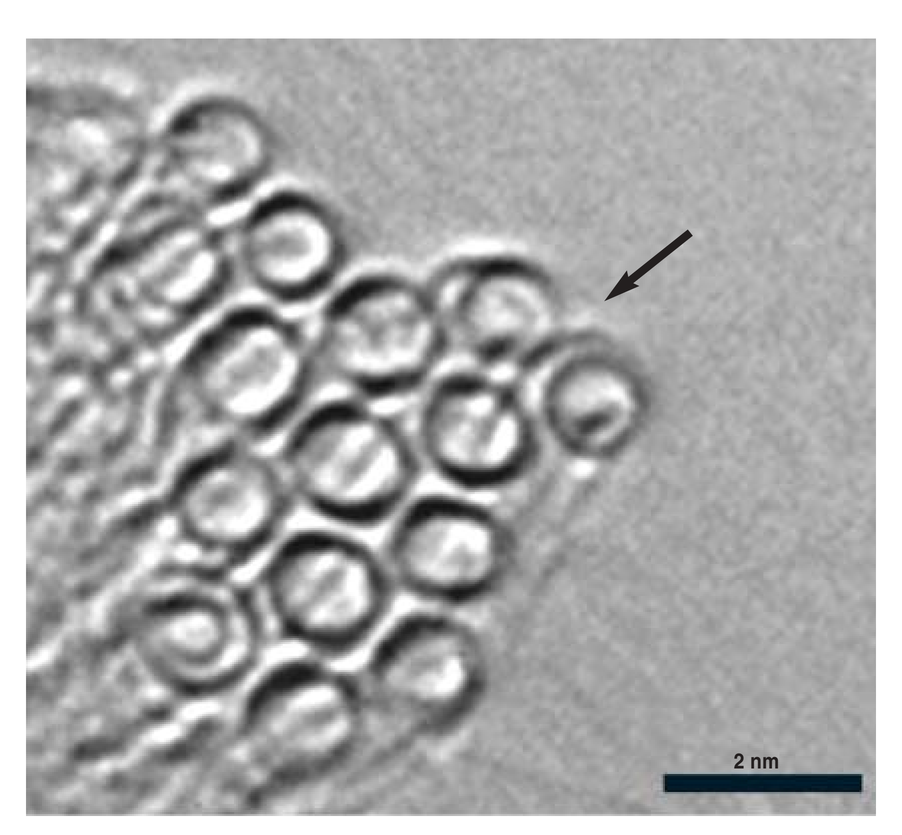


M. TERRONES Y H. TERRONES

1. SIMULACION TEORICA DE UNA RED tridimensional de nanotubos de carbono de una capa. En un futuro, este tipo de redes podrían utilizarse en la fabricación de tejidos ligeros y superresistentes, así como en dispositivos nanoelectrónicos.

La fabricación de instrumentos que nos hacen la vida más fácil se remonta a tiempos inmemoriales. Ya en la prehistoria, el ser humano construía utensilios con los materiales que tenía a su alcance. Empezó con la piedra, la madera y los huesos de animales. Posteriormente, descubrió las aplicaciones del bronce, el hierro y otros metales. En la actualidad, tras siglos de desarrollo de la ciencia de los materiales, una nueva era acaba de empezar: la edad de los nanomateriales.

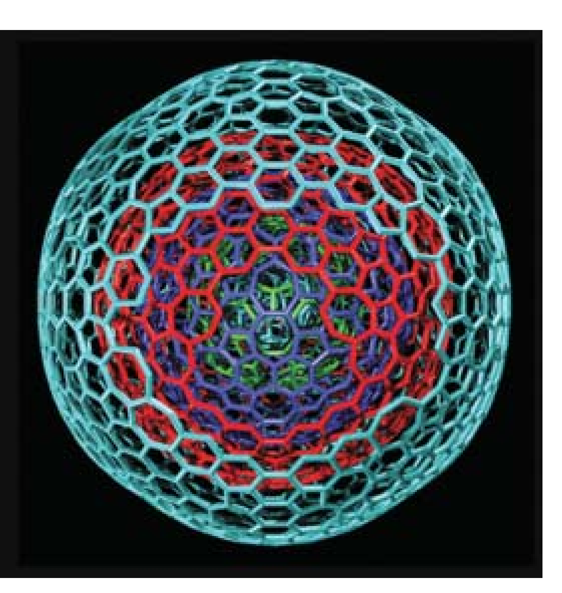
Cuando escribimos con un lápiz o contemplamos la belleza de un brillante en una joya, quizá no advirtamos que el grafito del lápiz y el diamante están hechos con el mismo tipo de átomos, a saber, átomos de carbono. Se trata de formas alotrópicas, es decir, estructuras con propiedades físicas distintas, pero constituidas por el mismo elemento químico. Además del grafito y el diamante, el carbono puede formar moléculas nanométricas (un nanómetro corresponde a la millonésima parte de un milímetro): fullerenos y nanotubos.



2. HAZ DE CATORCE NANOTUBOS de carbono de una capa y 1,4 nanómetros de diámetro. (Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución de una sección transversal.)

Fullerenos y nanocebollas

En 1985, mediante la simulación de explosiones interestelares en el laboratorio, Harold Kroto, de la Universidad de Sussex, y sus compañeros Richard E. Smalley y Robert F. Curl, de la Universidad de Rice, encontraron una nueva molécula de carbono (el hallazgo les valió el premio Nobel de química en 1996). Formada por 60 átomos de carbono (C_{60}) ordenados esféricamente, recibió el nombre de buckminsterfullereno, en honor al arquitecto que diseñó los primeros domos geodésicos: Richard Buckminsterfuller. En 1990, Wolfgang Krätschmer, del Instituto Max Planck, y Donald Huffman, de la Universidad de Arizona, sintetizaron los primeros cristales de C_{60}. Había nacido la nanotecnología del carbono.



3. SIMULACION TEORICA de una nanocebolla cuasiesférica con anillos heptagonales, hexagonales y pentagonales.

En la década de los ochenta, Sumio Iijima, del Laboratorio de Investigación Fundamental de NEC en Tsukuba, descubrió una estructura concéntrica de partículas poliédricas de grafito en películas delgadas de carbono amorfo. En 1992, Daniel Ugarte, de la Escuela Politécnica de Lausana, observó que la irradiación de electrones dentro de un microscopio electrónico permitía generar estructuras de carbono cuasiesféricas. Se trataba de fullerenos gigantes anidados: nanocebollas. Puesto que la molécula más interna resultó ser el C_{60}, las restantes fueron consideradas fullerenos gigantes. En 1997, los autores del artículo propusieron un modelo teórico que permitía comprender la formación del grafito cuasiesférico. A tenor de éste, las partículas poliédricas podían tornarse esféricas si se les añadían anillos heptagonales y pentagonales. Esta hipótesis concordaba con los resultados experimentales que Ugarte halló en 1992.

Las propiedades de las nanocebollas posibilitan múltiples aplicaciones. Pueden albergar metales magnéticos y carburos, lo que permitiría su uso para almacenar información. Bajo tratamiento térmico e irradiación simultánea se puede transformar su interior en diamante. Encapsulados en nanocebollas de carbono, el estaño o el plomo incrementan su punto de fusión hasta en 265 ºC, fenómeno que se podría aprovechar en la fabricación de dispositivos electró-

M. TERRONES Y H. TERRONES

nicos operativos a temperaturas elevadas.

Nanotubos de carbono

Ya en el decenio de 1970, el grupo de Morinobu Endo, de la Universidad de Shinshu, había publicado las primeras imágenes (tomadas por microscopía electrónica de transmisión) de nanotubos de carbono de una y varias capas. Sin embargo, en aquel entonces el interés se centraba en la fabricación de microfibras de carbono, por lo que dicho hallazgo no recibió su merecida atención. La revolución de los nanotubos no llegó hasta casi veinte años más tarde. En 1991, Sumio Iijima, del Laboratorio de Investigación Fundamental de NEC en Tsukuba, observó y caracterizó unas extrañas fibras nanoscópicas depositadas sobre una mota de hollín. Constituidas por carbono, regulares y simétricas, estas finas macromoléculas de impresionante longitud no tardaron en llamarse nanotubos. Aunque se crean espontáneamente en cualquier hoguera, se han descubierto varias formas de sintetizar estas estructuras tubulares: arco eléctrico entre electrodos de grafito, pirólisis de hidrocarburos sobre catalizadores metálicos, vaporización de grafito por rayo láser, vaporización de substratos carbonosos por energía solar y electrólisis mediante electrodos de grafito en sales iónicas fundidas. Más resistentes que el acero, ligeros, conductores térmicos, semiconductores y superconductores eléctricos, los nanotubos de carbono han revolucionado la ciencia de los materiales.

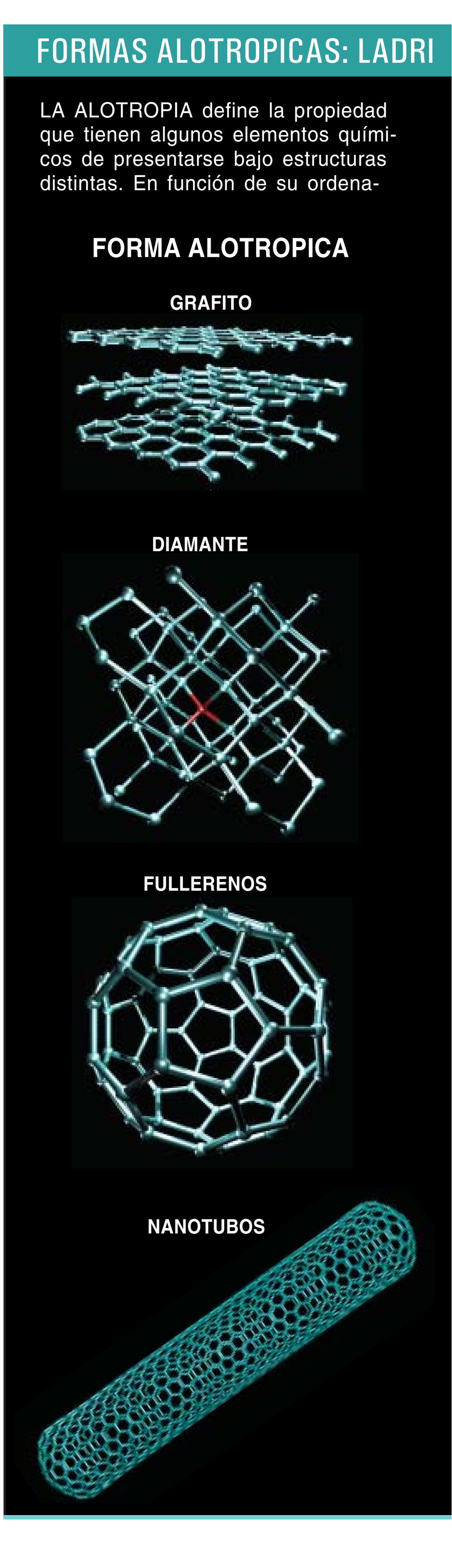
Combinando las reglas cuánticas que rigen la conductividad eléctrica con el tamaño y la geometría, los nanotubos presentan una complejidad electrónica única. Desde el carácter semimetálico/semiconductor del grafito hasta la superconducción, estas estructuras tubulares exhiben una gran variedad de comportamientos eléctricos en función del diámetro, la "torsión" (quiralidad) y el número de capas componentes. Estructuras de varias capas presentan semiconducción en un rango de 2 a 300 K. Nanotubos de una sola capa y 0,4 nanómetros de diámetro pueden comportarse como superconductores a temperaturas del orden de 15 K. Sin embargo, nanotubos de una capa con diámetros del orden de 1,4 nanómetros, operan como conductores cuánticos (la gráfica "voltaje en función de intensidad" resulta escalonada en vez de lineal). Merced a este repertorio de posibilidades, se ha recurrido a los nanotubos de carbono para desarrollar múltiples dispositivos nanoelectrónicos [*véase* "Introducción de los nanotubos en el dominio de la electrónica", por Philip G. Collins y Phaedon Avouris; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2001].

El enlace entre átomos de carbono constituye uno de los más robustos de la naturaleza. Esta característica confiere a los nanotubos (igual que a los diamantes y a los fullerenos, ambas estructuras con enlaces C-C en las tres dimensiones del espacio) unas propiedades mecánicas excepcionales. En función de la técnica usada para medir las deformaciones ocasionadas por la vibración térmica y las particularidades de la estructura molecular, el módulo de Young (parámetro que define la resistencia a la deformación) de los nanotubos oscila entre 1,3 y 1,8 terapascal. Tanta elasticidad les convierte en buenos aspirantes a ocupar el podio de las nanofibras más resistentes. Además, esta excelencia mecánica podría potenciarse mediante la unión de varios nanotubos de una sola capa en haces o cuerdas. De romperse un nanotubo, la fractura no se propagaría a los otros, puesto que se comportan como unidades independientes.

Merced a la buena relación entre diámetro y longitud, la excelente transferencia de sus propiedades mecánicas, la baja densidad y la alta conductividad eléctrica, los nanotubos constituyen unas de las mejores estructuras para introducirlas en matrices poliméricas. Basta un uno por ciento (en peso) de nanotubos multicapa para aumentar en un 40 por ciento la resistencia mecánica de un polímero. Otra forma de aprovechar las propiedades de los nanotubos consiste en recubrirlos con materiales cerámicos, como el óxido de silicio (vidrio) y el óxido de aluminio. Así, se mejoran las propiedades mecánicas y se evita la degradación en atmósferas oxidantes.

FORMAS ALOTROPICAS: LADRI

LA ALOTROPIA define la propiedad que tienen algunos elementos químicos de presentarse bajo estructuras distintas. En función de su ordena-

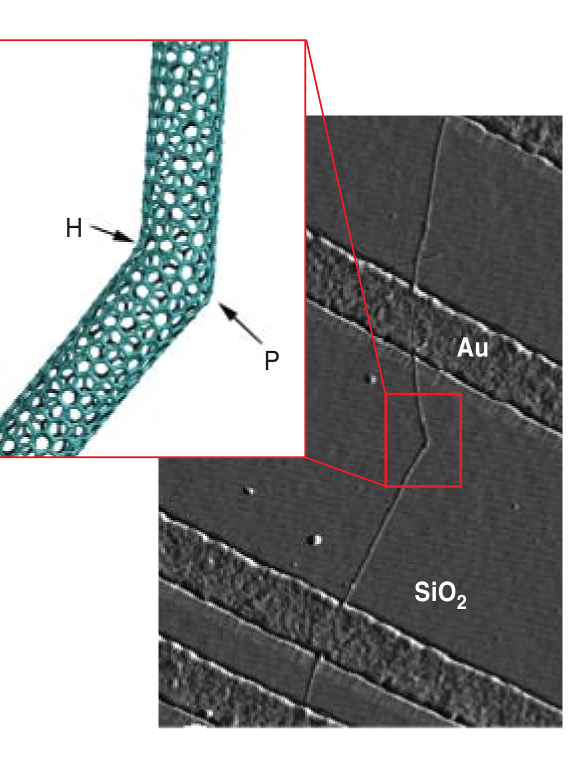


LLOS IDENTICOS, CONSTRUCCIONES DISTINTAS

ción en el espacio, un solo tipo de átomos genera una amplia variedad de materiales y propiedades físicas. La forma alotrópica más común del carbono es el grafito, aunque bajo presiones muy elevadas también se encuentra en forma de diamante. En el polvo interestelar y algunas formaciones geológicas terrestres se han encontrado fullerenos. Algunos tipos de hollín producidos en el laboratorio contienen nanotubos.

ESTRUCTURA	PROPIEDADES FISICAS
Cada átomo de carbono se une a otros tres, formando capas planas de hexágonos. El ángulo entre tres átomos vecinos es de 120º. Las capas están separadas por una distancia de 0,335 nanómetros.	El grafito es un sólido negro muy blando, puesto que sus capas de hexágonos, débilmente unidas, se deslizan entre sí con facilidad. Esta libertad de movimiento se traduce en una conductividad térmica semejante a la del cobre. El cuarto electrón de valencia de cada átomo (los otros tres se utilizan para unirse a los átomos vecinos) le confiere una conductividad eléctrica moderada.
Cada átomo de carbono se une a otros cuatro (*rojo*), localizados en los vértices de un tetraedro y separados a una distancia de 0,156 nanómetros. El ángulo entre tres átomos vecinos es de 109º.	Incoloro y trasparente, el diamante es el material más duro que se conoce (10 en la escala de Mohs). Dado que las uniones entre átomos de carbono ocurren en las tres direcciones espaciales, su estructura es capaz de resistir presiones enormes sin romperse (1180 GPa). Todos los electrones de valencia se utilizan para formar la red; por lo tanto, no conduce la electricidad. Su conductividad térmica quintuplica la del cobre.
Los átomos de carbono se organizan en una red esférica, de igual simetría que una pelota de fútbol. Cada molécula contiene al menos 12 pentágonos y más de un hexágono. El C_{60} (fullereno de 60 átomos de carbono) tiene un diámetro de 0,7 nanómetros y consta de 20 hexágonos y 12 pentágonos.	Las fulleritas, cristales de fullerenos, son blandas como el grafito. Sin embargo, si se comprime su volumen hasta un 70 % del valor inicial, superan la dureza del diamante. Sus propiedades eléctricas varían de un extremo a otro en función del compuesto: las fulleritas puras son aislantes; ahora bien, dopadas con metales alcalinos se comportan como superconductores a temperaturas que alcanzan los 40 K.
Los átomos de carbono se organizan en una red cilíndrica de hexágonos, que puede estar tapada por disposiciones hexagonales (con 6 pentágonos por hemisferio) o bien quedar abierta (con los extremos saturados con átomos de hidrógeno u otros grupos químicos). El diámetro oscila entre 0,4 y 100 nanómetros y la longitud puede alcanzar milímetros e incluso centímetros. Pueden tener una o varias capas.	En función de la orientación de los hexágonos con respecto al eje del tubo y del diámetro del mismo, encontramos nanotubos conductores o semiconductores. Estas nanofibras resisten presiones enormes sin romperse (1,8 TPa). Puesto que la estructura cede a movimientos longitudinales, la conductividad térmica resulta elevada a lo largo del tubo pero escasa en la dirección perpendicular.

M. TERRONES Y H. TERRONES



4. NANOCONMUTADOR DE CARBONO fabricado a partir de un nanotubo de una sola capa doblado con un ángulo de 30º sobre electrodos de oro (Au) y sustrato de sílice (SiO_2). Defectos estructurales, un heptágono (H) y un pentágono (P), generan el codo que divide el nanotubo en dos secciones: una metálica y otra semiconductora.

La posibilidad de transmitir calor a lo largo del eje del cilindro confiere a los nanotubos una conductividad térmica mayor, a temperatura ambiente, que la del diamante y el grafito. Los nanotubos multicapa son mejores conductores térmicos que las "esterillas" de nanotubos de una capa alineados. Por ese motivo, los nanotubos de carbono de una y varias capas podrían utilizarse como disipadores de calor. Sin embargo, los estudios en este campo son todavía escasos.

Aplicaciones de los nanotubos de carbono

La combinación de todas estas propiedades físicas, derivadas de la estructura molecular de los nanotubos, ofrece un amplio abanico de aplicaciones que la ingeniería está aprovechando en forma de dispositivos innovadores.

Para empezar, veamos cómo podrían mejorar los nanotubos el almacenamiento de gases. Las celdas de hidrógeno facilitan una combustión limpia (únicamente liberan agua al medio) que podría revolucionar la industria del transporte ecológico. Sin embargo, todavía existen algunas dificultades técnicas que impiden su aplicación. El principal problema radica en la necesidad de celdas livianas que acopien grandes cantidades de combustible. Si bien los valores de captación de hidrógeno deben mejorarse (los informes más solventes sólo hablan del cuatro al seis por ciento), los haces de nanotubos de una sola capa cuentan con cavidades internas e intertubulares que permiten almacenar el gas. Muy recientemente se ha demostrado que es posible almacenar nitrógeno, argón y helio a presiones elevadas (10.000-30.000 atmósferas) en el conducto interno de tubos multicapa. A tenor de estos resultados, los nanotubos podrían albergar hidrocarburos como el metano y convertirse así en los menores cilindros jamás construidos.

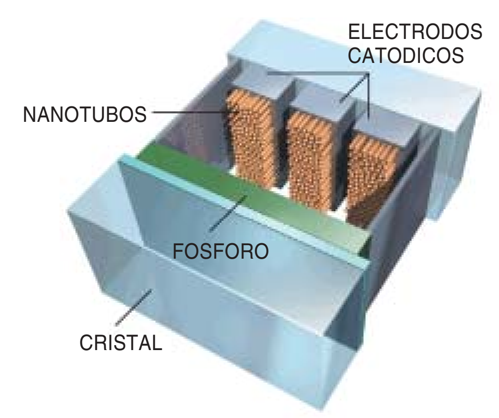
¿Podrían operar como sensores? En 2000, Hongjie Dai y sus colaboradores, de la Universidad de Stanford, demostraron que la conductividad de nanotubos de una sola capa variaba en función de la composición atmosférica. Por ejemplo, si los tubos se exponen repentinamente a una atmósfera que contiene un uno por ciento de amonio, la resistividad de los tubos aumenta casi al instante. Asimismo, si los nanotubos se exponen a un medio con 200 ppm (partes por millón o miligramos por litro) de dióxido de nitrógeno, la resistividad disminuye drásticamente. Esta propiedad permite pensar en mejores sensores químicos de gases tóxicos.

Dada la gran superficie y alta conductividad eléctrica, los nanotubos de carbono resultan también adecuados en dispositivos electroquímicos como supercapacitores (capacitores dieléctricos con capacitancias gigantes) y actuadores.

El grupo de Niu, de la compañía Hyper Catalysis demostró en 1998 que electrodos compuestos de nanotubos multicapa generan capacitancias específicas de 102 y 49 farad por gramo en celdas que contienen, por electrolito, ácido sulfúrico. Dichas celdas alcanzan densidades de potencia superiores a 8000 watt por kilogramo. Más recientemente se han generado capacitancias específicas de 163 farad por gramo. Estos supercapacitores de nanotubos multicapa podrían satisfacer la necesidad de grandes potencias y capacidades de almacenamiento de energía.

Los nanoactuadores podrían utilizarse para fabricar músculos artificiales. En nanotubos de una capa, se han observado resistencias a la deformación de unos 26 MPa (valor 100 veces mayor a los observados en los músculos animales). Estos dispositivos podrían trabajar con bajos voltajes a temperaturas de alrededor de los 350 ºC.

Los nanotubos de carbono ofrecen aplicaciones para dispositivos electrónicos. Al ser ultrafinos, podrían liberar espacio en los microchips para alojar más transistores,



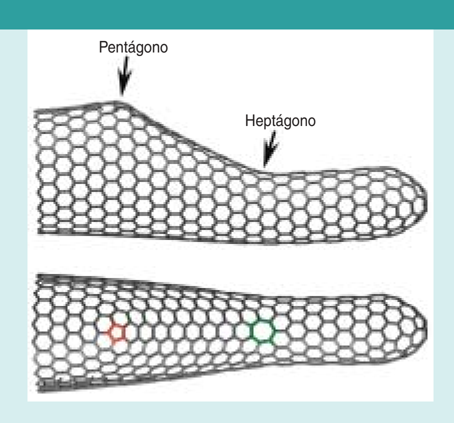


5. PANTALLA DE TV de nanotubos de carbono (*derecha*). A la izquierda, un esquema muestra los principales componentes del dispositivo (de D. Rotman en *Technology Review*, marzo 2002, págs. 38-45).

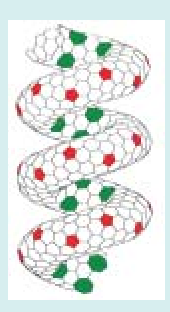
CORTESIA DE C. DEKKER (*arriba*); CORTESIA DE *SAMSUNG* (*abajo, derecha*); M. TERRONES Y H. TERRONES

NANOTUBOS A LA CARTA

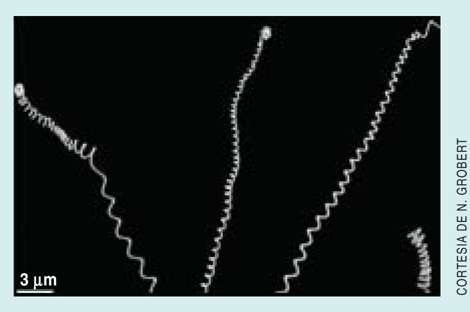
A PARTIR DE LA SIMULACION TEORICA de redes grafíticas, Alan Mackay, del Colegio Birkbeck, y Humberto Terrones predijeron en 1992 la existencia de anillos heptagonales y octagonales que introducían curvatura negativa en la estructura. Un año después, Sumio Iijima, del Laboratorio de Investigación Fundamental de NEC en Tsukuba, lo detectó experimentalmente. En la figura de la derecha, dos vistas muestran la punta de un nanotubo de carbono que presenta curvatura negativa debido a la presencia de un anillo heptagonal (*verde*), compensado con otro pentagonal (*rojo*). La combinación de estos y otros defectos estructurales en la red hexagonal del grafeno permite transformar los nanotubos en una gran variedad de estructuras.



HELICES



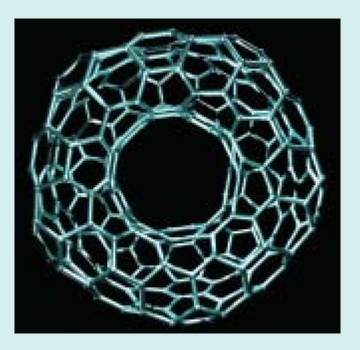
La distribución adecuada de anillos hexagonales, pentagonales (*rojo*) y heptagonales (*verde*) permite generar nanotubos helicoidales.



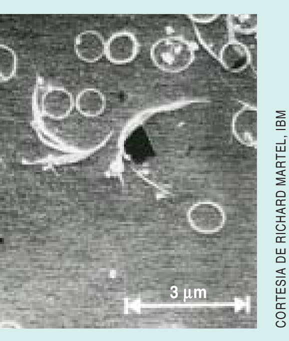
Las nanohélices de esta microscopía electrónica se han obtenido mediante la pirólisis de melamina sobre sustratos de óxido de cobalto a 1000 ºC.

CORTESIA DE N. GROBERT

TOROIDES



Las estructuras toroidales se obtienen mediante la combinación de pentágonos y heptágonos...

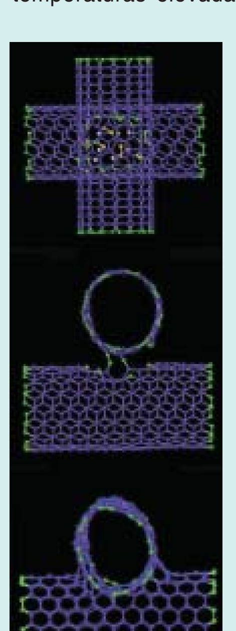


...o bien uniendo los extremos de un nanotubo abierto. Como éstos, que se han fabricado a partir de haces de nanotubos de una sola capa.

CORTESIA DE RICHARD MARTEL, IBM

REDES

LA COALESCENCIA de nanotubos de carbono se puede asociar a una “soldadura” de tuberías. Se produce de forma parecida al cierre de una “cremallera”. Se debe primordialmente a la generación de “vacantes” (se desprenden átomos de carbono de las redes de los tubos) y defectos en las estructuras. Muy recientemente se ha observado la creación de uniones del tipo “X” y “Y”, utilizando altas irradiaciones electrónicas a temperaturas elevadas.



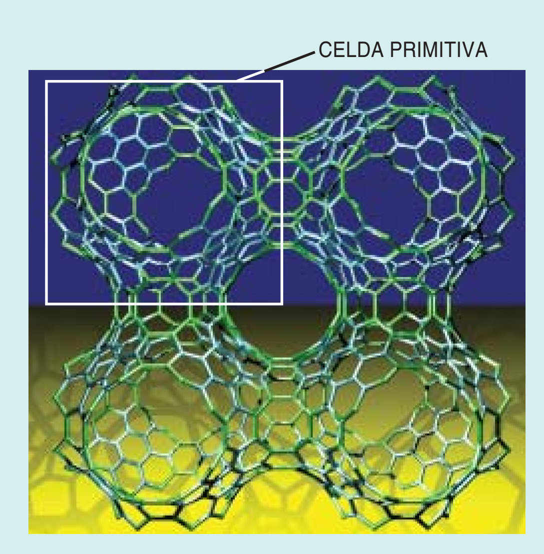
Vista superior de dos nanotubos de una capa orientados 90º uno con respecto al otro.

Tras calentar la muestra a 700 ºC durante 10 picosegundos (billonésimas de segundo), los nanotubos comienzan a unirse mediante la generación de enlaces entre los átomos de carbono adyacentes a las “vacantes”.

Tras 220 picosegundos, los dos nanotubos terminan la unión tipo “X”.

ESTRUCTURAS PERIODICAS

LA CURVATURA negativa que introducen los anillos heptagonales se puede utilizar para generar estructuras periódicas con áreas superficiales de entre 2000 y 3000 m^2/g. La complejidad de éstas depende de la complejidad de la celda primitiva, unidad que se repite una y otra vez hasta formar el “tejido” de carbono.



Superficie hiperbólica que se genera por la unión de cuatro celdas primitivas.

M. TERRONES Y H. TERRONES



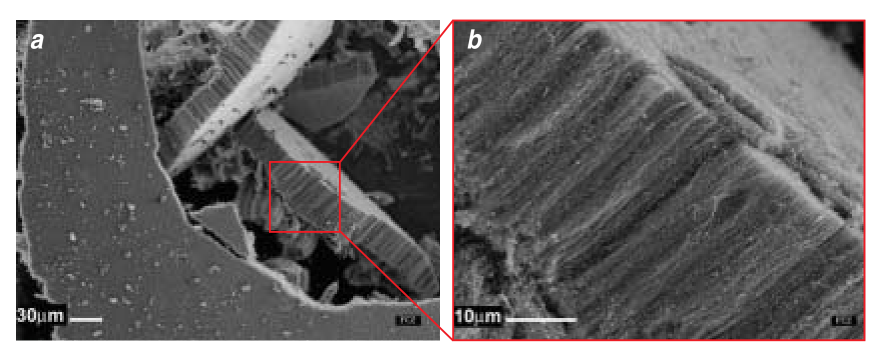
6. ESTRUCTURAS SUPERRESISTENTES. Esta imagen obtenida por microscopía electrónica de transmisión muestra cómo nanotubos de carbono de varias capas resisten grandes tensiones de deformación sin experimentar fractura.

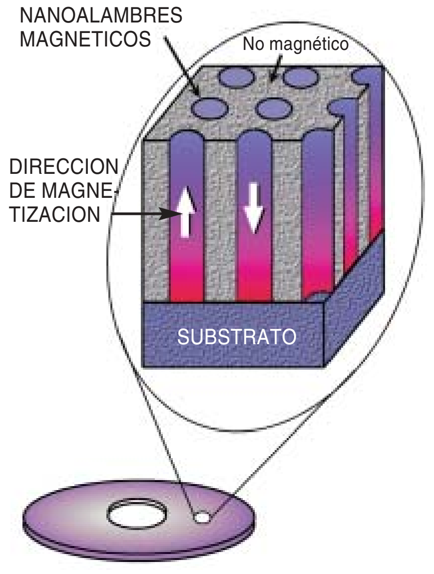
a la vez que solucionar los problemas térmicos y de estabilidad. Mediante un microscopio de barrido por efecto túnel, y controlando el voltaje entre la punta de éste y la nanoestructura, los nanotubos de carbono se manipulan y seccionan para fabricar dispositivos electrónicos. En 1998, el grupo de Cees Dekker, de la Universidad de Delft, fabricó el primer transistor que operaba a temperatura ambiente. Conectaron un nanotubo semiconductor de una capa entre dos nanoterminales. La velocidad de conmutación resultó excelente. Más tarde, los grupos de Dekker y Lieber fabricaron circuitos con uno, dos y tres nanotubos de una capa capacitados para realizar operaciones lógicas: "Y", "O" y "NI". A partir de un nanotubo de carbono con defectos de anillos de 5 y 7 átomos se puede fabricar un nanoconmutador, puesto que una sección del tubo será semiconductora, mientras que la otra será conductora.

Hasta la fecha, los mejores dispositivos para almacenar energía en aparatos portátiles (ordenadores, teléfonos móviles, cámaras digitales, etc.) eran las baterías de litio, en las que se intercalan iones de litio entre los planos atómicos del grafito. El grupo de Endo ha aumentado la eficiencia de dichas baterías sustituyendo el grafito por nanofibras de carbono. Ha demostrado que pueden mejorarse todavía más si las nanofibras se combinan con nanotubos de carbono dopados con boro.

Las aplicaciones se extienden a las fuentes de emisión de electrones. Cuando se aplica un potencial entre la superficie de un nanotubo de carbono y un ánodo, la punta del nanotubo emite electrones debido a la curvatura, o a los enlaces insaturados de carbono en el caso de nanotubos abiertos. Dopados con boro, los nanotubos emiten electrones a voltajes aún menores y ofrecen mayor intensidad luminosa. Este fenómeno puede aprovecharse para fabricar fuentes de emisión de campo en numerosos dispositivos. Las pantallas de TV mejoran en definición porque cada píxel está formado por uno o varios nanotubos. Las lámparas de alta luminosidad resultan económicas, consiguen funcionar con voltajes muy reducidos y exhiben vidas de larga duración (superiores a las 8000 horas en la emisión del verde del fósforo). Reemplazando la pantalla de fósforo por blancos de metal, se generan rayos X que han permitido realizar micrografías de huesos humanos.

Por fin, el almacenamiento magnético de datos espera también el desarrollo de las nanoestructuras. Durante los últimos decenios, la generación de nanoalambres de hierro ha fracasado a causa de su fácil oxidación. Dado que los nanotubos se pueden llenar con metales y aleaciones, los nanoalambres se podrían encapsular dentro de nanotubos de carbono para prevenir la formación de óxidos que alteren el campo magnético. Recientemente,



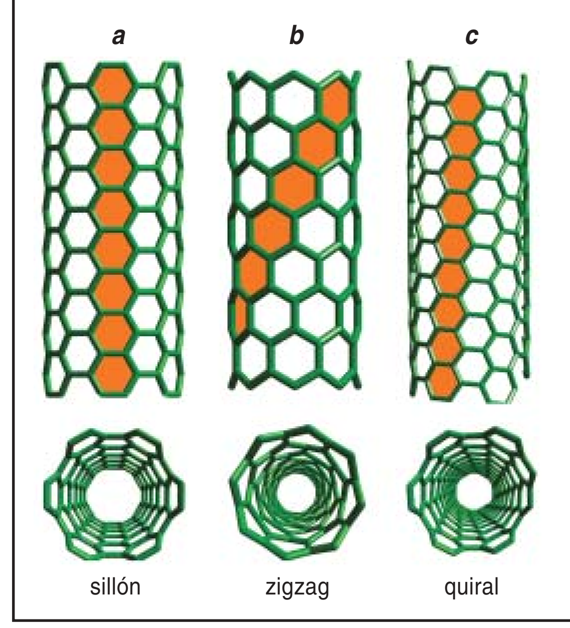


7. NANOTUBOS RELLENOS DE HIERRO en una micrografía electrónica de barrido de baja (*a*) y alta (*b*) resolución. El esquema de la derecha muestra de qué modo estos nanoalambres ferromagnéticos sirven para el almacenamiento de datos. Magnetizado en una dirección u otra (0 o 1 en el código binario), cada nanoalambre constituye un bit de información.

CORTESIA DE P. M. AJAYAN (*arriba*); M. TERRONES Y H. TERRONES

GEOMETRIA Y PROPIEDADES ELECTRICAS

LAS PROPIEDADES ELECTRICAS de un material dependen de la separación entre los estados ocupados por electrones y los estados de conducción vacíos y disponibles para que los electrones salten a ellos. Cuanto más fácil sea el acceso a dichos estados de conducción, mayor será la conductividad eléctrica. En los nanotubos de carbono de una capa, esta separación energética varía en función de la orientación de los hexágonos con respecto al eje del tubo y del diámetro del mismo. Por tanto, sus propiedades eléctricas dependen de la geometría de la molécula.



Nanotubos no quirales (*a* y *b*)
En los nanotubos no quirales (sillón, o "armchair", y zigzag), las disposiciones hexagonales en las partes extremas del tubo (arriba y abajo) son siempre paralelas al eje del tubo. Esta distribución de los átomos, junto con un diámetro adecuado, permite que los electrones accedan libremente a los estados de conducción. A tenor del diámetro del tubo, dos tercios de los nanotubos no quirales (todos en el caso de los de tipo "armchair") son conductores. El resto se comportan como semiconductores.

Nanotubos quirales (*c*)
En los nanotubos quirales, los hexágonos definen un cierto ángulo con respecto al eje del tubo. Esta orientación de los átomos dificulta el acceso de los electrones a los estados de conducción. En virtud del ángulo de torsión, unos dos tercios son semiconductores y el resto conductores.

M. TERRONES Y H. TERRONES

se ha conseguido alinear nanotubos llenos de hierro formando películas de menos de dos milímetros cuadrados de superficie y un espesor inferior a 40 micrometros (o milésimas de milímetro). Los nanoalambres de hierro están constituidos por monocristales de entre 5 y 40 nanómetros de diámetro y menos de 10 micrometros de longitud. El diámetro externo de los nanotubos de carbono oscila entre 20 y 70 nanómetros; su longitud es inferior a 40 micrometros. Resultados preliminares muestran altas coercividades magnéticas (en torno a 430-2500 oersted), mucho mayores que las del hierro y los nanoalambres de níquel y cobre. Este tipo de materiales pueden aplicarse al almacenamiento magnético de información. Cada nanoalambre se magnetizaría en dos posibles direcciones (correspondientes a 0 o 1 en el código binario). Así, cada nanoestructura constituiría un bit y aumentaría la densidad de información. A partir de estos materiales pueden desarrollarse nuevos productos para la industria de la xerografía y tóners magnéticos.

El carbono puede revolucionar la ciencia de materiales y la nanotecnología del siglo XXI. A partir de estas polifacéticas moléculas se fabricarán nuevos polímeros, sensores y fuentes luminosas. Sin embargo, nos hallamos muy lejos de ver cómo podrían las nanoestructuras de carbono sustituir los microchips de silicio. Debemos desarrollar nuevos sistemas, controlar la producción y abaratar los procesos de su elaboración, si queremos que el sueño de las nanoestructuras de carbono se convierta en realidad en los años venideros.

Los autores

Mauricio y **Humberto Terrones** trabajan en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, donde Humberto dirige el departamento de materiales avanzados y Mauricio el nuevo Centro Nacional de Caracterización de Materiales Nanoestructurados. Pioneros de la nanociencia del carbono en México, los hermanos Terrones se dedican al desarrollo teórico y experimental de nuevas nanoestructuras.

Bibliografía complementaria

SCIENCE OF FULLERENES AND CARBON NANOTUBES. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus y P. C. Eklund. Academic Press; San Diego, 1996.

NANOTUBES: A REVOLUTION IN MATERIAL SCIENCE AND ELECTRONICS. M. Terrones, W. K. Hsu, H. W. Kroto, D. R. M. Walton, en *Fullerenes and Related Structures*; Topics in Chemistry Series, dirigido por A. Hirsch, vol. 199, págs. 189-234. Springer-Verlag, 1998.

ADVANCES IN THE CREATION OF FILLED NANOTUBES AND NOVEL NANOWIRES. M. Terrones, N. Grobert, W. K. Hsu, Y. Q. Zhu, W. B. Hu, H. Terrones, J. P. Hare, H. W. Kroto, D. R. M. Walton, en *Materials Research Society Bulletin*, vol. 24, págs. 43-49; 1999.

SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE XXI CENTURY: SYNTHESIS, PROPERTIES AND APPLICATIONS OF CARBON NANOTUBES. M. Terrones, en *Annual Reviews of Materials Research*, vol. 33, pág. 419; 2003.

Juan M.R. Parrondo

La paradoja del autostopista

Supongamos que se lanza un dado no trucado un gran número de veces y que apostamos un euro a que saldrá un cinco. El pago justo de esta apuesta sería de 6 euros, puesto que la probabilidad de que el resultado de una tirada sea cinco es 1/6. Por pago entendemos lo que el jugador recibe a cambio del euro que depositó, es decir, recibe 6 euros en total o, si lo prefieren, recibe 5 más el euro que depositó.

Un posible resultado del juego es el que se ve en la figura 1. He escrito en rojo todos los cincos que aparecen en la secuencia de tiradas. Una cantidad interesante desde el punto de vista probabilístico es el número de tiradas que separan un cinco del siguiente. Todo aficionado al parchís, y a cualquier juego de azar, sabe que esta cantidad es sumamente caprichosa. En ocasiones podemos esperar muchos turnos hasta que aparezca el número deseado, mientras que otras veces puede aparecer en tres o hasta en cuatro tiradas seguidas. En la secuencia de la figura 1, por ejemplo, entre el primer y segundo cinco hay 8 turnos, entre el segundo y el tercero, 7 turnos, y así sucesivamente. Las respectivas distancias se indican en azul, encima de la llave que une dos cincos consecutivos.

¿Cuál es la probabilidad de que esa distancia sea, digamos, igual a 4? Para que entre un cinco y el siguiente haya 4 turnos, es necesario que no aparezca un cinco durante tres turnos, y que aparezca uno precisamente en el cuarto turno. La probabilidad de que esto ocurra es el producto de las probabilidades de cada uno de los eventos, es decir:

$$\text{Prob [distancia} = 4] = \frac{5}{6} \times \frac{5}{6} \times \frac{5}{6} \times \frac{1}{6}$$

ya que la probabilidad de que no salga el cinco es 5/6 y la de que sí salga es 1/6. En general, la probabilidad de que dos cincos consecutivos estén separados por n turnos es:

$$\text{Prob [distancia} = n] = \left(\frac{5}{6}\right)^{n-1} \times \frac{1}{6}$$

En la figura 2 se puede ver una gráfica de esta probabilidad en función de la distancia n (puntos azules). En contra de lo que a primera vista cabría esperar, la distancia más probable es de sólo un turno. Sin embargo, el valor medio de esa distancia, n, es igual a 6. Este valor medio puede calcularse sumando todas las posibles distancias pesadas con su correspondiente probabilidad:

$$\langle n \rangle = 1 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{5}{6} \times \frac{1}{6} + 3 \times \left(\frac{5}{6}\right)^2 \times \frac{1}{6} + \cdots$$
$$\cdots + n \times \left(\frac{5}{6}\right)^{n-1} \times \frac{1}{6} + \cdots$$

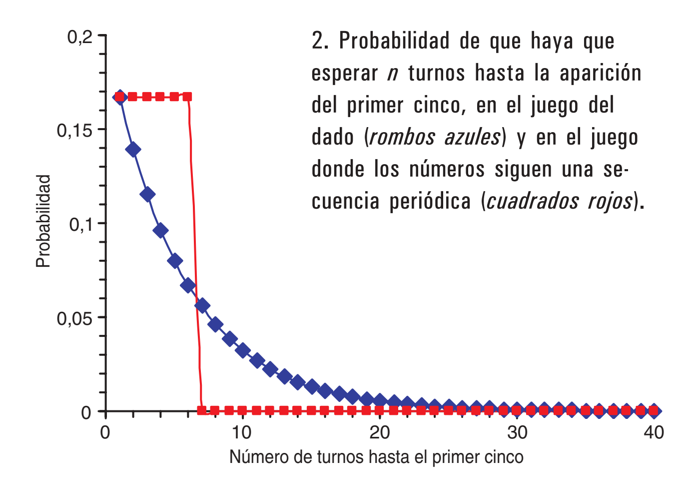
pero resulta una suma con infinitos términos que es difícil de evaluar. Una forma sencilla de calcular el valor medio $<n>$ es la siguiente. Si jugamos un gran número de turnos, pongamos 6000, el cinco aparecerá, aproximadamente, un sexto de las veces, es decir, unas 1000 veces. La suma de las distancias entre cincos consecutivos es igual a la distancia entre el primer y el último cinco. Esta suma es sólo ligeramente inferior a 6000, de modo que la distancia media es, aproximadamente 6000/1000 = 6. El error cometido con esta aproximación se hace cada vez más pequeño si aumentamos el número de turnos jugados, de modo que, para un número infinito de turnos, el valor medio será exactamente 6.

Supongamos ahora que usted llega a la mesa de juego con la partida ya empezada. ¿Cuál es entonces el número medio de tiradas que tiene que esperar hasta que salga el primer cinco? La respuesta es de nuevo 6 turnos. La razón es que cada tirada es completamente independiente de las anteriores. El dado no "recuerda" cuánto hace que salió un cinco, de modo que la probabilidad de que salga en el primer turno a partir de la incorporación del jugador es 1/6, la de que salga en el segundo turno es 5/6 x 1/6, y así sucesivamente. Es decir, la probabilidad de que salga el cinco en el enésimo turno es exactamente igual a la probabilidad de que la distancia entre dos cincos consecutivos sea n. Por tanto, el número medio de tiradas que nuestro jugador tiene que esperar hasta que salga el primer cinco es también 6. Esto es en cierto modo sorprendente, sobre todo si planteamos la cuestión de otro modo, tal y como se hace en el gráfico superior de la figura 3. En rojo se muestran las distintas apariciones de los cincos. La flecha verde indica el momento en el que el jugador se incorpora a la partida. De la figura parece desprenderse que la distancia entre dos cincos consecutivos será siempre mayor que el número de turnos que tiene que esperar el jugador

8 turnos, 7 turnos, 2 tur., 3 tur., 7 turnos, 3 turnos

6, 4, 6, 5, 3, 1, 6, 6, 1, 1, 2, 5, 4, 4, 3, 4, 3, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 4, 3, 1, 1, 3, 2, 5, 1, 3, 5, 4

1. 35 tiradas de dado. El cinco ha salido 7 veces y las llaves indican el número de turnos entre un cinco y el siguiente.



2. Probabilidad de que haya que esperar n turnos hasta la aparición del primer cinco, en el juego del dado (*rombos azules*) y en el juego donde los números siguen una secuencia periódica (*cuadrados rojos*).

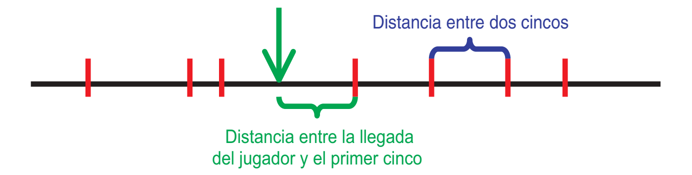
para ver el primer cinco. Sin embargo, la "falta de memoria" del dado nos asegura lo contrario. El valor medio de ambas cantidades es exactamente el mismo.

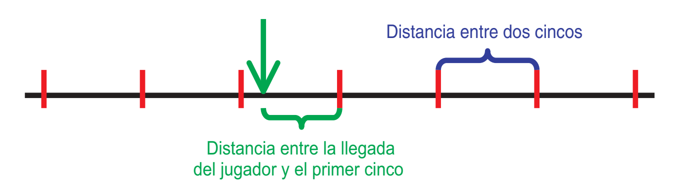
Pensemos en una variante, aparentemente trivial, del juego. Supongamos que en lugar de un dado, los números van saliendo consecutivamente 1, 2, 3, 4, 5, 6, 1, 2, 3, etc. En este caso, la distancia entre dos cincos consecutivos es siempre la misma: 6 turnos, tal y como se muestra en el gráfico inferior de la figura 3. Si un jugador se incorpora a la partida en un turno elegido al azar, el número que aparece en ese turno puede ser cualquiera de los seis y el número de turnos que tiene que esperar hasta el primer cinco puede ser 1, 2, 3, 4, 5 ó 6, todos ellos con la misma probabilidad. Por tanto, el valor medio de este número de turnos es:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{6} \times (1+2+3+4+5+6) = 3{,}5$$

Este resultado es más acorde con nuestra intuición. Si entre dos cincos hay una cierta distancia media, lo que uno espera es que la distancia entre la llegada del jugador y el siguiente cinco sea, más o menos, la mitad. En el caso de la secuencia fija de números, esto es lo que ocurre. Sin embargo, en la secuencia de tiradas del dado no es así: la distancia media entre cincos es igual a la distancia media entre la llegada y el siguiente cinco. Este hecho se conoce como la *paradoja del autostopista*, porque puede también reformularse del siguiente modo. Un autostopista llega a una carretera muy poco concurrida, por donde los coches pasan aleatoriamente, pero de forma que el tiempo medio entre un coche y otro es de 15 minutos. El autostopista cree que tendrá que esperar unos 7 minutos y medio hasta la llegada del siguiente coche, pero no es así. Si los coches aparecen de la misma forma que los cincos en nuestro juego, entonces el tiempo medio de espera será también de 15 minutos. Si el autostopista, en lugar de esperar coches que llegan aleatoriamente, pudiera ir a una parada de autobús en donde éstos llegaran, pongamos, cada 15 minutos (y con puntualidad), entonces el tiempo medio de espera sí sería de 7 minutos y medio. El esquema de ambas situaciones es idéntico al de la figura 3.

La paradoja del autostopista se ha aplicado recientemente al transporte de partículas brownianas. Cualquier partícula pequeña en el seno de un líquido o un gas, como una proteína en el interior de la célula, una mota de hollín en el aire o un grano de polen en agua, experimenta un movimiento errático que se llama movimiento browniano, debido a que el primero en observarlo fue el botánico inglés Robert Brown, en 1827, al mirar a través del microscopio unos granos de polen inmersos en agua. Desde hace unos años, se están estudiando mecanismos para transformar este movimiento errático en un movimiento dirigido en una dirección. Uno de estos mecanismos es una especie de válvula que atrapa a la partícula browniana que llega por la izquierda, la deja pasar hacia la derecha, pero no le permite regresar. Hernán L. Martínez, de la Universidad estatal de California, y yo mismo hemos estudiado distintos modos de redistribuir estas válvulas a lo largo de una línea. Si las válvulas aparecen y desaparecen cada cierto tiempo, resulta más efectivo diseminarlas al azar que periódicamente. La razón es precisamente la paradoja del autostopista. Piensen en la línea horizontal de la figura 3 como el espacio que recorre la partícula. Las líneas verticales rojas en la figura 3, que antes representaban las apariciones del cinco o las llegadas de los coches, serían ahora las válvulas. Cuando éstas reaparecen, la partícula se encuentra en un punto al azar, que estaría representado por la flecha verde de la figura 3. La distancia que puede llegar a recorrer la partícula en su movimiento errático es precisamente la que abarcan las llaves verdes de la figura. Hemos visto que esa distancia, en media, es casi el doble en el caso de la distribución aleatoria que en el caso de la distribución periódica. Por tanto, si se distribuyen las válvulas aleatoriamente, se podrán transportar las partículas brownianas hacia la derecha más rápido que si se distribuyen periódicamente. Este es otro caso curioso en el que el desorden o el azar mejoran el rendimiento de un sistema.





3. Representación esquemática de los dos juegos descritos en el texto. En el primero se lanza un dado, mientras que en el segundo los números aparecen consecutivamente. En ambos, el jugador llega en algún turno escogido al azar.

Mark Fischetti

CAJAS NEGRAS EN LOS AUTOMOVILES

Datos sobre ruedas

Coches y camiones están equipados con una pequeña y robusta caja de circuitos electrónicos capaz de revelar cómo estaba funcionando el vehículo antes de un accidente. Pocos conductores eran conscientes de que iban sentados sobre ese dispositivo hasta el pasado agosto, cuando la policía pidió la caja del Cadillac del diputado de EE.UU. Bill Janklow, después que éste atropellara y matara a un motorista en Dakota del Sur.

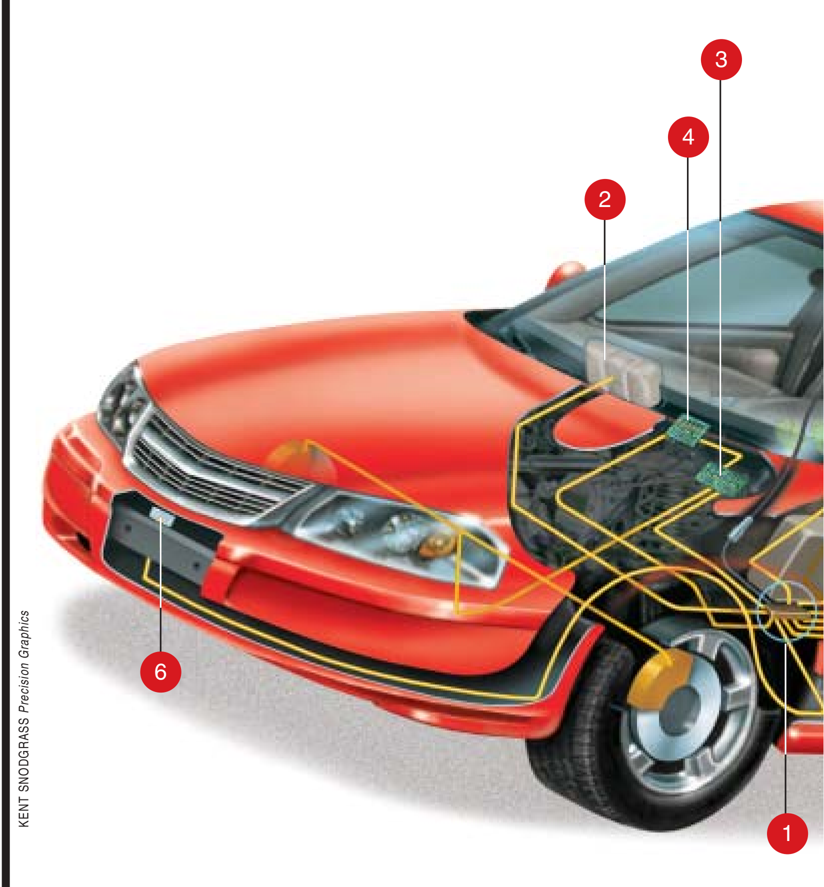
Las registradoras de sucesos empezaron a instalarse en los vehículos estadounidenses a mediados de la década de 1970 para que desplegaran almohadillas de seguridad (airbags) cuando detectaran un cambio muy brusco de velocidad. Los fabricantes de automóviles recogen los datos de las cajas negras en accidentes elegidos al azar para analizar qué incrementos de velocidad causan el disparo del dispositivo de seguridad. Pero desde 1999, esos dispositivos, normalmente instalados bajo la alfombrilla del asiento delantero, registran la velocidad del vehículo, el régimen (rpm) del motor, la aplicación del acelerador y del freno, y la situación de los cinturones de seguridad. Combinados con los informes sobre lesiones, esos datos se emplean para mejorar las prestaciones o retirar del mercado los sistemas defectuosos.

Si bien las cajas sólo guardan los datos correspondientes a los cinco últimos segundos, la policía y los fiscales han comprobado que tan crucial información puede ser de gran ayuda para averiguar el papel del conductor en un accidente: ¿Estaba acelerando? ¿Se saltó una señal de stop? ¿Aceleró para pasar un semáforo en rojo?

Esta medida, nunca deseada por los fabricantes de automóviles, "ha sorprendido un poco a todos", dice James Kerr, de Vetronic Corporation, que diseña programas informáticos para descodificar las cajas negras. Esa sorpresa lleva pareja escasa protección de datos personales.

Los medios han añadido "una gran cantidad de desinformación", dice Jim Schell, de General Motors. Las cajas no revelan dónde ha estado un automóvil o qué velocidad llevaba antes de los cinco segundos precedentes a un accidente. Pero tales detalles podrían obtenerse ampliando la memoria del chip de la caja y conectando a bordo un receptor GPS. Una posibilidad que parece estar preocupando a los conductores.

1. LA CAJA NEGRA (1) ordena a las almohadillas de seguridad (airbag) delanteras (2) que se inflen si el acelerómetro de la caja detecta una bajada brusca de la velocidad, reveladora de los primeros milisegundos de un impacto fuerte. Mientras tanto, la caja monitoriza el módulo de control de la transmisión del vehículo (3), el módulo de frenado (4), y registra la velocidad de éste, el régimen (rpm) del motor y la aplicación del acelerador y del freno durante los cinco segundos anteriores al impacto. Los sensores de combado (5) informan a la caja sobre los cinturones de seguridad: si están o no abrochados. La caja puede asimismo leer (pero no registrar) los acelerómetros de los sensores del parachoques (6), de las almohadillas de seguridad laterales (7) y de los monitores de prevención de vuelco (8) en los vehículos así equipados.

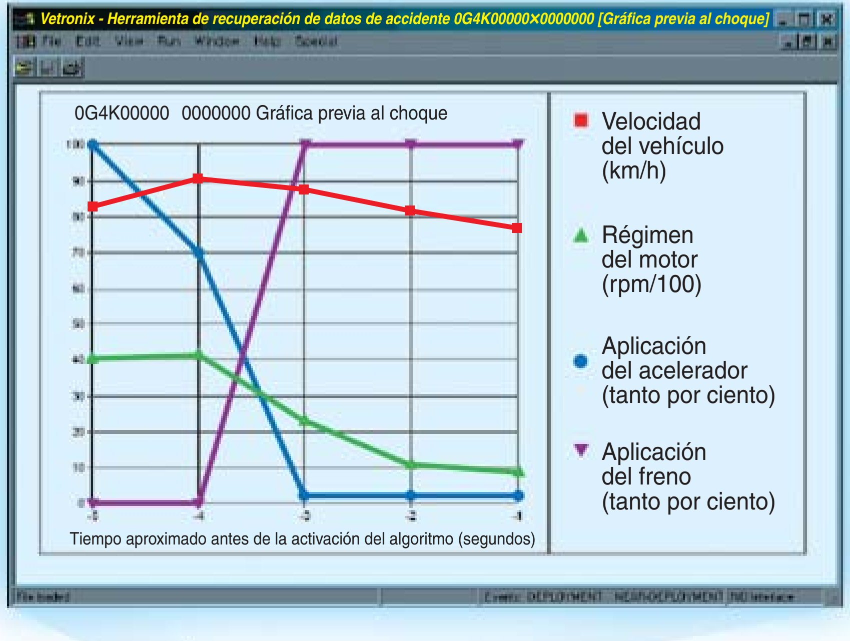


KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

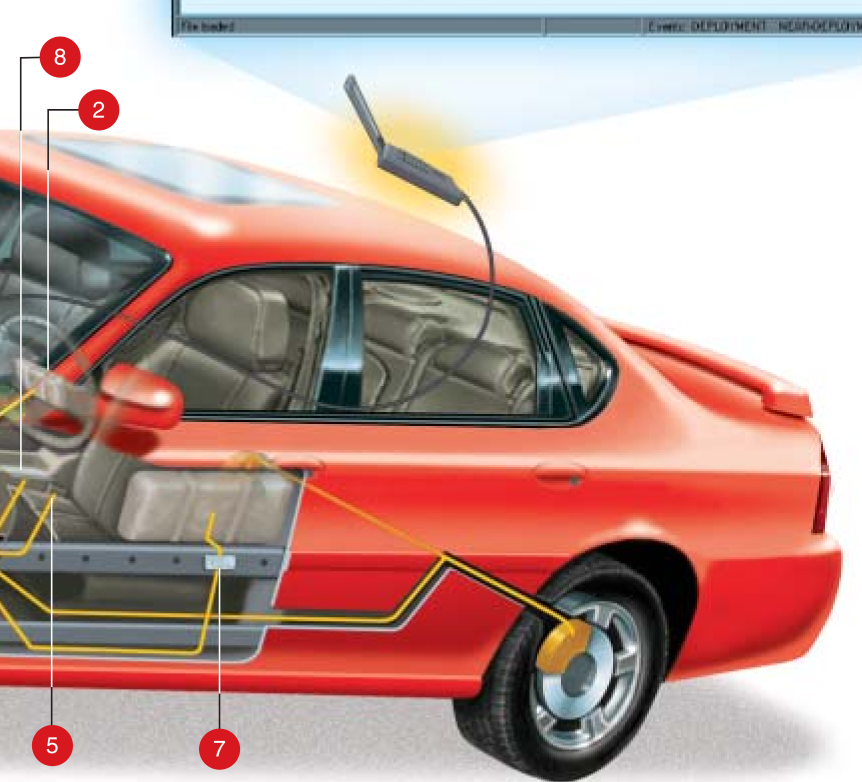
➤ **QUIEN LO DESCODIFICA:** Los fabricantes de vehículos analizan los datos de las cajas negras con sus propios ordenadores. Sólo General Motors, Ford e Isuzu tienen un contratista autorizado, Vetronix, que diseña programas informáticos para descifrar sus registradoras. El paquete cuesta 2500 dólares, pero esas empresas esperan que los departamentos de policía y los bufetes de abogacía lo compren para agilizar su trabajo. Así, los fabricantes se ahorrarán el tiempo y el dinero que cuesta descodificar las cajas con motivo de una investigación. Todavía no existen normas sobre el registro y la extracción de los datos, pero ya están en ello en el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos y en la Sociedad de Ingenieros de Automoción.

➤ **CADA VEZ MAS CERCA:** Puede que las registradoras del futuro rastreen los acelerómetros que captan los movimientos laterales del vehículo —que disparan las almohadillas de seguridad laterales— y los cambios bruscos en la columna de la dirección que activan los actuadores antivuelco. Aseguradores y demandantes muy posiblemente recurrirían a esos datos para determinar, por ejemplo, si un conductor ha dado un volantazo. Si bien las empresas de automoción no necesiten almacenar esa información para controlar los sistemas de seguridad, podrían guardarla, ya que saben que cada vez se utiliza más en la investigación de accidentes.

➤ **BUENOS Y MALOS:** En una encuesta reciente de General Motors, la opinión de los clientes sobre las cajas negras se mostró dividida al cincuenta por ciento. Según conjetura el portavoz, Jim Schell, quienes se consideran buenos conductores acogen bien un procesador que verifique su inocencia en los accidentes, mientras que los malos conductores no quieren que nadie hurgue en sus transgresiones.



2. LA GRAFICA elaborada a partir de la información de la caja negra muestra que cinco segundos antes de la colisión, el conductor aflojó rápidamente el acelerador. Un segundo después frenaba bruscamente. La maniobra logró reducir notablemente las revoluciones del motor; la velocidad del vehículo, sin embargo, sólo disminuyó hasta 77 km/h un segundo antes de que el choque disparase las almohadillas de seguridad.



3. UNA REGISTRADORA de datos de vuelo (en la cola) supera con mucho a una caja negra de automóvil. Almacena la altitud, la dirección, la velocidad, la aceleración y el empuje de cada motor durante las 25 últimas horas de vuelo. Una grabadora (en el morro) capta de 30 a 120 minutos de las conversaciones de la tripulación y los ruidos ambientales de la cabina. Estos dispositivos resisten impactos a 268 nudos, temperaturas de 1000 grados Celsius y las presiones que operan a más de 600 metros bajo el mar durante 30 días.

Wolfgang Bürger

Pequeñas cometas

El museo de cometas de Tokio está —según las guías— cerca de la estación de tren principal de la capital japonesa. Pero hasta un paradero tan claro como ése fue para nosotros, que no poseíamos conocimientos del lugar ni de la lengua, un objetivo complicado. Eso sí, el metro estaba tan lleno que difícil habría sido que nos cayésemos. Luego, sólo tuvimos que caminar unos cientos de metros desde la estación a través de las rápidas corrientes humanas que fluían en todas las direcciones cardinales.

Con el maestro cometero: A decir verdad, esperábamos una exposición sobre los muchos siglos de historia de las cometas japonesas. Pero en el piso alto de aquella casa poco vistosa encontramos sólo un taller y una tienda. La decepción se tornó enseguida en alegría cuando conocimos a Takeshi Nishibayashi, del club japonés de construcción de cometas. Pronto se hizo llamar "Nishi". Sin mayores exordios, nos dio una introducción muy práctica al arte japonés del montaje de cometas. Nos invitó al vuelo de una de las creadas por él; sería al día siguiente, en un pequeño parque de su barrio, Ogikubo. Fue una casualidad feliz la que nos acercó tan pronto a un maestro experimentado del arte de las cometas. Las cometas japonesas, su historia y técnica, fueron, junto a las maravillosas peonzas niponas, uno de los dos temas de estudio por los que permanecí con mi mujer tres meses en Japón, invitado por la Sociedad para la Promoción de la Ciencia y como profesor visitante del Instituto Metropolitano de Tecnología de Tokio en Hino.

Ya que resultaba pesado entenderse en un inglés chapurreado, Nishi pasó a la praxis. Con gran rapidez construyó como por encanto, ante nuestros ojos, con una hoja de papel grueso y un par de tiras de cinta adhesiva Tesafilm, y sin más instrumentos que una regla, un lápiz y unas tijeras, una sencilla "cometa de oficina" (*véase el recuadro* "Instrucciones de montaje para la cometa japonesa de oficina"). Un segundo papel mucho más fino se transformó, una vez cortado en bandas longitudinales pegadas entre sí con celo, en la cola doble de la cometa, mientras que unos metros de hilo trenzado fuerte se convirtieron en la cuerda. Con poco viento, vuela



FOTOGRAFIAS: CHRISTOPH PÖPPE

1. Después de más de un cuarto de hora de montaje, la "cometa de oficina" está preparada para levantar el vuelo.





2. La pequeña cometa de papel permanece, estabilizada gracias a su cola, casi inmóvil en el aire (*derecha*). Una cruz de varillas muy finas de bambú impide que la superficie de papel se deforme. La cometa "Tsukizuro", construida artesanalmente (*izquierda*), sólo mide 14 centímetros de ancho.





FOTOSTUDIO MALL



FOTOSTUDIO MALL

3. Las cometas en miniatura de Yuhji Kanno. A la izquierda “Yakko”, de 5 cm de ancho; a la derecha arriba “Sode”, un poco más pequeña; debajo, una versión en miniatura de “Sode”, con una envergadura de 7 milímetros.

bien. Aún hoy la guardo en mi colección de juguetes funcionales.

Las cometas pequeñas necesitan colas que las estabilicen y les permitan volar casi como una cometa grande. Sin cola, las agitan las turbulencias del aire; los remolinos amenazan con derribarlas, incluidos los pequeñísimos que provocamos nosotros mismos al movernos.

Despegue de la cometa: Al día siguiente por la tarde, Nishi nos llevó desde su casa hasta el sitio de despegue de cometas que prefería, un tranquilo lugar en medio de Tokio. Iba siempre unos cuantos pasos por delante de nosotros y llevaba en la mano esa cometa obra suya mencionada más arriba, de metro y medio de envergadura, como si se tratara de un gran pájaro. Tras el rectángulo que dibujaban las copas de los árboles brillaba el cielo azul; abajo, en el parque, no había ni rastro de viento. ¿De verdad quería Nishi que su cometa despegase ahí, en ese momento?

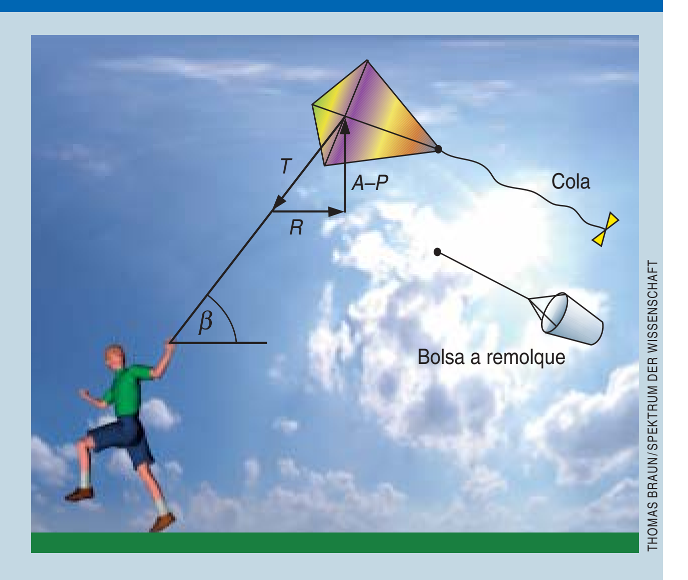
¡Pues sí! Consiguió que su cometa, probada ya en competición —con ella había ganado el “premio a la cuerda más vertical” en un certamen internacional—, aprovechase el estrecho margen que había para el despegue y se quedara suspendida en el cielo. Gracias a unas fotografías, aún tengo muy reciente la escena: sin dar una paso, maniobró la cometa, soltando y recogiendo la cuerda con mucho cuidado, de manera que atravesase la pequeña abertura espacial definida por el punto donde Nishi se encontraba y las copas de los árboles, y la condujo soberanamente a la corriente de aire,

La paradoja de la cometa

Atada a una cuerda, vuela la cometa con viento. El exceso $A - P$ de la fuerza ascensional aerodinámica A sobre su peso P junto con la resistencia aerodinámica R en la dirección del viento tensan la cuerda de la cometa. Para la tensión de la cuerda se cumple $T = \sqrt{(A - P)^2 + R^2}$.

¿Se iría volando la cometa si soltáramos la cuerda? Desde luego que no. Quizá subiría al principio, pero luego caería porque es más pesada que el volumen de aire que desaloja. Para generar su fuerza ascensional A, tiene que desviar continuamente hacia abajo parte del viento que le viene de cara. Para ello necesita la componente vertical $T \operatorname{sen} \beta$ de la tensión T, que está en equilibrio con la fuerza $A - P$. Sin el tirón de la cuerda hacia abajo ($T \operatorname{sen} \beta > 0$) la cometa no puede ascender en el aire. ¿No es esto paradójico?

Si se soltara de golpe la cuerda de la cometa, el equilibrio de fuerzas establecido anteriormente desaparecería en la dirección horizontal y el viento arrastraría con fuerza la cometa muy lejos. No se puede anticipar sin más cómo se moverá, si entrará en barrena o si descenderá planeando. En cualquier caso, descenderá enseguida siguiendo la dirección del viento.

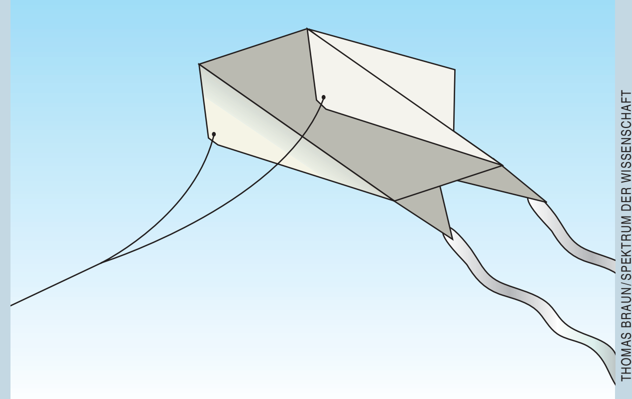


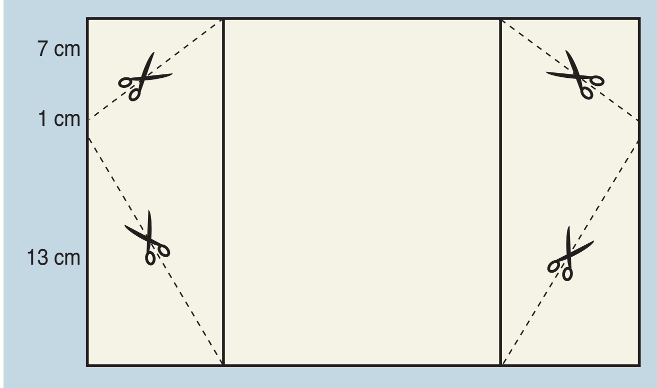
THOMAS BRAUN/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Una cola (o una bolsa a remolque) consigue que la cometa sea menos sensible a las variaciones del viento. Cuanto más aporte la cola a la resistencia, menor será el ángulo β que forma la cuerda con el suelo (y volará más horizontalmente).

Instrucciones de montaje para la cometa japonesa de oficina

Doble un trozo de papel grueso (de unos 120 gramos por metro cuadrado) de formato DIN A4 paralelamente al lado más corto a un cuarto y tres cuartos de la longitud del más largo; quedarán así dos partes laterales y una central. Corte en cada sección lateral un triángulo pequeño y otro grande, de manera que nos quede en cada sección lateral un trapecio con un lado muy corto. Refuerce esos lados cortos con cinta adhesiva, perfore en cada uno de ellos un pequeño agujero, ate fuertemente unos hilos trenzados a esos agujeros y una ambos hilos (de igual longitud) a la cuerda de la cometa unos 50 centímetros más allá.





Los dos trapecios se doblan hacia abajo y sirven de "aletas ventrales" de la cometa. A los triángulos recortados también se les encuentra una utilidad: los dos mayores como "aletas dorsales", con la esquina más puntiaguda hacia delante, pegadas con cinta adhesiva al cuerpo de la cometa justo por encima de las aletas ventrales; las menores, como "aletas de cola" (horizontales) que prolongan el cuerpo hacia atrás. Pegue a cada aleta de cola una cola, formada por una larga cinta de fino papel de unos 1,50 metros de longitud.

sobre los árboles. Así nos demostró lo que yo había leído en la literatura especializada, pero no llegaba a creer: aun con muy poco viento, quizás hasta en una calma perfecta, se puede elevar una cometa desde un lugar fijo.

Tras la impresionante demostración, Nishi nos pudo dejar el carrete de la cuerda de la cometa. Así, sobre la marcha, no se necesitaban ni una comprensión profunda de los principios de la aerodinámica ni una habilidad especial para elevar más y más la cometa, hasta que se convirtió en un punto oscuro en el cielo y perdimos de vista la cuerda de nailon allá arriba. Habíamos sobrepasado la máxima altura permitida en Alemania: cien metros (por lo que yo sé, se impone ese límite pensando en el tráfico aéreo).

Además, después de la actuación, Nishi nos obsequió con una cometa hecha por él mismo. Desgraciadamente, le esperaría, ya en Alemania, el clásico destino: con fuerte viento otoñal, la rasgó un árbol alto, y en el intento de salvarla acabó destrozada.

La reconstrucción de esa obra maestra fracasó; en la bibliografía no se podían encontrar las instrucciones de montaje. Eso sí, descubrí durante la búsqueda que Nishi también era una autoridad en cometas de combate indias: en su "Libro de las cometas de combate", David Gomberg las llama directamente "cometas de Nishi". En la lucha de cometas, los competidores se sitúan en azoteas e intentan cortar con la cuerda de su cometa, cubierta de puntas de vidrio, la de las cometas rivales. Son cometas de una cuerda, pero no permanecen quietas en el cielo. Giran en círculos si se afloja la cuerda en el momento adecuado.

Cometas en miniatura: Para mantener vivas las artesanías tradicionales, se ha nombrado en Japón a innumerables artesanos "monumentos vivientes". Se les puede observar trabajando en su taller, donde también venden sus obras a precios no menos monumentales. En la colonia de artesanos del viejo Tokio, entre fabricantes de peonzas, canasteros y demás artistas tradicionales, tiene su taller Yuhji Kanno. Las cometas decorativas en miniatura son su especialidad, las mayores del tamaño de una hoja, las más pequeñas como la cabeza de una cerilla. Cada una lleva impresa una pequeña pintura hecha a mano, de figuras fantásticas, históricas o mitológicas. Kanno asegura que hasta las cometas en miniatura más pequeñas pueden volar.

Sensibles como son al mínimo movimiento de aire, necesitan todas una cola. Sobre la historia de las cometas en miniatura Kanno nos puede contar que hacia el final de la época feudal las gentes de Edo, el actual Tokio, hicieron volar cometas sobre los campamentos del odiado guerrero samurái Yakko con representaciones de soldados de infantería de los señores feudales. Más tarde se convertirían en cometas lúdicas y miniaturas que servían de amuletos de la suerte para el destino, la fama, la fortuna y una larga vida. En el museo de cometas de Tokio se exponen cometas de Kanno.

Socialización de la ciencia

Epoca medieval

MEDIEVAL HERBAL REMEDIES. THE OLD ENGLISH HERBARIUM AND ANGLO-SAXON MEDICINE, por Anne van Arsdall. Routledge; Londres, 2002. DER DEUTSCHE "MACER". Edición crítica de Bernhard Schnell en colaboración con William Crossgrove. Max Niemayer Verlag; Tübingen, 2003.

MEDICINE BEFORE SCIENCE. THE BUSINESS OF MEDICINE FROM THE MIDDLE AGES TO THE ENLIGHTENMENT, por Roger French. Cambridge University Press; Cambridge, 2003.

HISTORY AND PHILOSOPHY OF THE MATHEMATICAL SCIENCES, dirigida por I. Grattan-Guinness. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 2003. FIBONACCI'S LIBER ABACI. LEONARDO PISANO'S BOOK OF CALCULATION. Edición preparada por L. E. Sigler. Springer; Nueva York-Berlín-Heidelberg, 2003.

JOHN BURIDAN. PORTRAIT OF A FOURTEENTH-CENTURY ARTS MASTER, por Jack Zupko. University of Notre Dame Press; Notre Dame, 2003. SUBJEKT UND METAPHYSIK. DIE METAPHYSIK DES JOHANNES BURIDAN, por Gerhard Krieger. Aschendorff Verlag; Munster, 2003.

Ni con barreno saltan muchos prejuicios y errores en torno a determinados momentos y ciertas figuras de la ciencia. Uno de los disparates más contumaces —léanse las páginas de opinión y suplementos culturales de los periódicos hispanohablantes de ambos lados del Atlántico— se recrea con el latiguillo del obscurantismo medieval. No se propagaría tal especie si no se declarara tesis apodíctica en las aulas universitarias. Coinciden los expertos en que la obscuridad de la ciencia medieval se reduce hoy a la ingente cantidad de manuscritos por descubrir y, en consecuencia, estudiar. Repercute esa limitación en el conocimiento parcial que tenemos de la difusión del saber, de su socialización en el Medievo. Un ejemplo palmario de dicha transmisión y recepción amplia nos lo ofrece, con el perfil emergente de una tradición paneuropea de un corpus común de textos, la traducción al vulgar de herbarios, lapidarios, bestiarios, recetarios y antidotarios.

En torno al año 1000 se vertió al anglosajón un conjunto de remedios conocido por *Old English Herbarium*. Atribuido erróneamente a Apuleius Platonicus, el texto de partida corrió por el occidente europeo desde mediados del siglo IV o principios del siguiente hasta bien adentrado el Renacimiento (*Medieval Herbal Remedies*). Fue el primer herbario que se imprimió en Italia (1481). El *Herbarium* del Pseudoapuleyo constituía, en realidad, una compilación anónima, de putativo título original *Herbarium Apulei Platonici traditum a Chirone Centauro, magistro Achilles*. La asignación a "Apuleyo" debió de producirse en la baja Edad Media, período en que se propaga también ampliado con otros escritos.

Su autor se apoyó en Dioscórides, cuya *De materia medica* estableció el patrón a seguir por los textos posteriores: descripción de la planta, su desarrollo, forma de identificarla y aplicación terapéutica. El falso Apuleyo bebió también en Plinio el Viejo, que escribió sobre las facultades medicinales de las especies en su enciclopédica *Historia naturalis*. Y partió, asimismo, de Galeno, quien desarrolló una terapia fundada en la división cuatripartita de los humores (sangre, bilis negra, bilis amarilla y flema); el desequilibrio entre ellos explicaba la enfermedad; su equilibrio aseguraba una vida sana. Galeno fue, sin comparación, la autoridad médica medieval. En sus preparaciones incluía éste ingredientes exóticos, como arcillas y tierras procedentes de muchos lugares. La teoría galénica permea los *herbarios, recetarios* y *regimina sanitatis* medievales, que relacionan las propiedades medicamentosas y dietéticas con la doctrina de los humores.

Ya en torno al 790 d.C. se compila *Das Lorscher Arzneibuch* (Codex Bambergensis), de naturaleza similar al *Herbarium* del Pseudoapuleyo. Asociado a la reforma carolingia, de su estudio se desprende que los monasterios benedictinos constituían la fuente principal del conocimiento médico en Europa continental e Inglaterra. El códice, comentado hace unos años aquí mismo, aportaba información sobre fármacos, cultivo y preparación de plantas medicinales, saber que pasaba oralmente y en forma escrita de unos monjes a otros, a los pacientes y a los laicos. Se va así conformando un género literario que, por su extensión, los historiadores distinguen entre composiciones breves y largas. El *Herbarium* se inscribiría entre las primeras.

El *Herbarium* del Pseudoapuleyo cruzó el canal de la Mancha en latín, probablemente bastante antes del reinado del rey Alfredo. Cuando se tradujo al inglés antiguo (lo que ocurrió al menos en dos ocasiones), se convirtió en canon oficial. El *Old English Herbarium* no se ciñe a una mera traducción aleatoria de remedios vegetales mediterráneos, sino que refleja un conocimiento práctico de las plantas, ampliamente disponible en la Inglaterra de su tiempo a través de la aclimatación, el cultivo y la importación. (No se olvide, además, que hubo un período cálido en el norte de Europa que duró desde el siglo nono hasta el siglo XIII.) Recoge en torno a unas 185 plantas medicinales, listadas por





Der deutsche "Macer". Prólogo.

su nombre e ilustradas una treintena. Siguen a su denominación las condiciones morbosas que las plantas ayudan a sanar, las indicaciones sobre su administración y otras.

La versión anglosajona, que nos ha llegado en cuatro manuscritos, pertenece a la primera hornada de escritos médicos vernaculares de la Europa medieval. A mediados del siglo XIX cayó en manos de Oswald Cockayne, un erudito excéntrico interesado por los orígenes del anglosajón, quien lo trasladó al inglés contemporáneo en *Leechdoms, Wortcunning, and Starcraft of Early England*. Lo que en este clérigo fue incursión filológica, Anne van Arsdall lo convierte, limpiado de distorsiones, en un tratado de historia de la materia médica, que coteja con otros momentos, y otros contextos, de la farmacopea natural.

El primer herbario escrito en alemán no apareció hasta los decenios iniciales del siglo XIII (*Der deutsche "Macer"*). Consta de 97 capítulos sobre otras tantas plantas medicinales. Pese a su importancia central en la bibliografía médica, sólo ahora, gracias al trabajo de años de Bernhard Schnell y William Crossgrove, disponemos de su edición crítica, acompañada del texto latino original. El *Macer* germano ha pervivido en dos versiones: *Altere deutsche Macer*, una traducción completa del *Macer Floridus,* que existía ya en la primera mitad del siglo XIII, y *Wiener Macer*, que vierte sólo ocho capítulos y se conoce desde el siglo XIV. (En el siglo XV apareció una traducción distinta, todavía por investigar, el *Jüngerer deutscher Macer*.) Aquí se expone la primera traslación íntegra.

El estudio del *Macer* supera las cuatro dificultades principales que entraña la investigación en un género literario que se caracteriza por ser, en su estructura formal, un vocabulario descriptivo de plantas y en el que cada capítulo se consagra a una planta, su aplicación médica, su preparación y otros aspectos asociados. Atañe la primera dificultad al propio objeto de investigación, fronterizo entre la historia de la medicina, la botánica y la filología. La segunda dificultad, derivada de la anterior, estriba en el propio estado actual de la investigación, ayuna de una visión de conjunto, sin un listado orientativo de fuentes e influencias, pobre además de ediciones impresas y críticas. La tercera dificultad guarda relación con la rémora de los estereotipos, anclados en una visión lineal de Dioscórides y el Pseudoapuleyo a los herbarios del siglo XVI. Por fin, la investigación debe proceder consciente de la ingente cantidad de manuscritos tardomedievales que almacenan polvo en las bibliotecas, sin catalogar ni analizar.

El *Macer* se inscribe en una tradición alemana, monástica, que numera, tras el texto antes mencionado, el *Hortulus* de Walahfrid Strabo, redactado hacia el 840, y el *De rerum naturis* de Hrabanus Maurus, unos dos años posterior. Continúa con el franco *De virtutibus herbarum* de Odo de Meung, en el siglo XI. En esta misma centuria aparece *Macer Floridus*, un poema didáctico en hexámetros, que, junto con el *Circa instans,* se convertirá en uno de los herbarios más difundidos en la Edad Media. El *Macer* nos ha llegado con numerosas variantes. Sin prólogo, empieza por la "artemisia" (*Artemisia vulgaris*). Las dos plantas siguientes, "abrotanum" (*Artemisia abrotanum*) y "absinthium" (*Artemisia absinthium*), corresponden ahora a un mismo género. Tras ellas se nos presentan "urtica" (*Urtica dioica*), "allium" (*Allium sativum*), "plantago" (*Plantago maior*), "ruta" (*Ruta graveolens*), "apium" (*Apium graveolens*) y otras plantas cuya familiaridad compartimos nosotros con los medievales.

Del examen detenido de su estructura y contenido, ambos afines al *Liber de gradibus* de Constantino el Africano, podemos sospechar una fuente común. El momento de confección del *Macer* se fecha entre el último tercio del siglo XI y el primero del siguiente. En algunos manuscritos se atribuye la autoría a Odo de Meung, aunque ciertos autores adivinan la mano de Marbod de Rennes, autor reconocido de un lapidario. El enorme éxito del herbario en Occidente se manifiesta en su recepción en lenguas vernáculas. Hay manuscritos del siglo XII donde aparece el *Macer Floridus* escrito en latín con glosas en alemán. Son los primeros pasos hacia la creación de un vocabulario vegetal de referencia, del máximo interés en ese ámbito.

Mas para entender el cañamazo que confiere textura a ese saber, hemos de abrir *Medicine before Science*. En él Roger French nos ha dejado como legado un largo ensayo que trasciende los límites medievales, si bien convierte ese período en centro de su ponderada síntesis, un tanto velada por el enfoque dado: la constitución de los facultativos egresados de la universidad como elite social. Bascula sobre una tesis que, si bien no es original suya, a él se debe su desarrollo: la medicina se torna ciencia cuando introduce en sus esquemas explicativos el lenguaje y la visión del mundo y del hombre que le aporta la filosofía natural, aristotélica por supuesto. Una filosofía

natural elaborada por Galeno que renació en la Universidad de Oxford durante los primeros años del siglo XIII y se instaló, mediada esa centuria, en la de París.

French toma perspectiva y se remonta a Hipócrates, sistematizado y mediatizado por el de Pérgamo. Sumada a esa medicina griega, pudo iniciarse una tradición latina con Celso, que, sin embargo, y pese a algún avance, se perdió con la caída del imperio de Occidente. Celso entero y la mayor parte de Galeno permaneció ignorado hasta la Edad Media. La medicina académica quedó confinada en el imperio de Oriente. Hubo, no obstante, una tradición médica alejandrina en el área de Salerno durante los siglos sexto y séptimo, que seguía a modo de canon la extensa obra de Galeno compendiada, desde el año 500, en los "Veinte libros". En Alejandría, el alumno comenzaba por familiarizarse con el *De sectis*, comentado por Juan de Alejandría. Un maridaje ciertamente paradójico. Mientras Galeno se inclinaba por los métodos de la observación sensible de los empiristas, el comentario de Juan de Alejandría debe adscribirse a las tendencias racionalistas. La influencia del comentarista alejandrino será decisiva en la deriva de la medicina medieval, apoyada en la filosofía natural del Estagirita. Se refleja esa progresiva dependencia en los propios métodos escolares. El elemental empezaba por el llamado *accessus ad auctores*, técnica a través de la cual el profesor presentaba un elenco protocolario de cuestiones al introducir un nuevo texto. El *comentario* suponía un peldaño más adelantado, aunque también muy rígido en su exposición de temas formalizados.

Pero en el siglo séptimo Alejandría cayó en poder de los árabes. Se inició el proceso traductor del griego al árabe, que prosiguió con otras culturas grecohablantes del Mediterráneo oriental, cuya matemática, medicina y filosofía los nuevos dominadores comenzaron a admirar y asimilar. La labor traductora va asociada al entorno de Hunain ibn Ishaq (*c*. 808-873), quien se preocupó por verter el griego, a veces vía siríaco, con notable pulcritud. Correspondió a otros reunir la medicina en grandes síntesis de referencia.

Muy distinta de la docencia bizantina y árabe es la impartida en la alta Edad Media latina. En ésta, el aprendizaje no se realizaba en una escuela, sino que los pupilos acudían a un maestro de prestigio. La colección de textos preferida por éste no tenía por qué coincidir con el corpus favorito de otro. En ese período inicial prima el carácter aplicado sobre el teórico, casi inexistente. No se expone apenas anatomía; la prognosis se reduce a listas de signos de adivinación; se esquematiza la acción de los humores y se posterga la etiología de las enfermedades. En cambio, se concentra la atención en torno a la farmacia y *materia medica*. Pero entre las primeras traducciones carolingias al latín figuran ya los *Aforismos* de Hipócrates. (Consta que la abadía de Montecasino recibió un ejemplar de esa obra en el siglo décimo.)

La recuperación económica, asociada a la emergencia de las ciudades y del comercio, promovió la creación de escuelas municipales, institución hasta entonces aledaña a la catedral o el monasterio. Se intensifica el intercambio cultural. En ese nuevo esplendor sobresale la figura clave de Constantino el Africano (m. 1087), un mercader del norte de Africa. Llegado a la bahía de Salerno, quedó sorprendido de que los latinos carecieran de tratados sobre el pronóstico a partir de la orina. Constantino ingresó en Montecasino y se entregó a la traducción al latín de los libros que los árabes habían tomado de los griegos, así como de los grandes compendios árabes; de manera muy significativa, el *Pantegni* de Haly Abbas, que principia con una exposición teórica.

Salerno, próximo a Montecasino, era por entonces un lugar reputado como centro de estudios médicos. Del grado de formalización de los mismos nos habla la aparición de manuales. De ese sustrato brota el que muy pronto dio en llamarse la *Articella*, una gavilla de temas, anudada en un comienzo en torno a los *Aforismos*. Pronto se añadieron los *Pronósticos*. Incluía también un breve tratado sobre uroscopia del bizantino Theophilus. El único componente teorético de la *Articella* inicial era la *Isagoge* de Joannitius,



Pronóstico a partir de la orina. (Ilustración del siglo XIII.)

un breve tratado de un centenar de sentencias que exponía los aspectos principales de la naturaleza básica de la medicina.

Los médicos latinos comenzaron a conocer las ventajas de una trama filosófica en la medicina árabe, al par que sus filósofos —pensemos en la escuela de Chartres— frecuentaban el *Pantegni*. En esa línea, Guillermo de Conches se alejaba de la explicación simbólica del relato sobre la creación de Eva a partir de la costilla de Adán para enhebrar una descripción literal, física. Pero hasta mediados del siglo XII, los medievales disponían sólo de la "vieja lógica" aristotélica: las *Categorías* y el *De intepretatione*. Esta última se ocupa de los enunciados lógicos; las *Categorías*, que abordan los términos empleados en los silogismos, se agrupaban en sustancia, cantidad, cualidad, relación, lugar, tiempo, posición, estado, acción y pasión. En filosofía aristotélica, la "cualidad" carecía de expresión cuantitativa; pero en la teoría médica, la cualidad de un fármaco, que indicaba el medio por el que ejercía su efecto, portaba cierta cifra de eficacia. La cuantificación de las cualidades constituyó un tema medieval muy debatido.

En la segunda mitad del siglo XII, merced a las traducciones de Jacobo de Venecia, se entronizó la "nueva lógica", la segunda parte del *Organon* aristotélico. Entre los tratados recuperados se numeraba el *De sophisticis elenchis*, que enseñaba a descubrir los fallos de la argumentación, las falacias. En los *Topica*, el discente aprendía a razonar bien sobre un problema a partir de opiniones contrastadas. Importantes fueron también los *Analíticos*. (Los *analíticos* era el término que acuñó Aristóteles para designar su lógica.) Los *Analitica Priora* ahondaban en el silogismo; los *Posteriora*, en el conocimiento demostrativo. Los *Analíticos Posteriores* preludiaban el estudio del mundo físico y orgánico. Cuando los textos naturalistas del Estagirita comenzaron a traducirse, avanzada la segunda mitad del siglo XII, el caudal de conocimientos sobre el mundo y la vida se sistematizó. En particular, en cuanto su enseñanza pasa al *studium generale*.

En las facultades de medicina, creadas en la segunda mitad del siglo XIII, se va sustituyendo la *Articella* por el *Canon* de Avicena y el *Colliget* de Averroes. Suplantados, en parte, a su vez, por lo que se ha dado en llamar el nuevo Galeno y, en especial, sus escritos sobre teoría de la complexión. Mas la medicina escolástica no alcanzaría su apogeo hasta que los teóricos no aplicaron la matemática de la cuantificación a las cualidades que constituían la complexión.

La matemática medieval constituye hoy un campo de intensa investigación. Para hacerse una idea general de contexto, el lector puede acudir a la enciclopédica *History and Philosophy of Mathematical Sciences*, que, dirigida por I. Grattan-Guinnes, acaba de ser reeditada. Junto a la matemática aplicada a la mecánica y a la óptica, amén de la tradición geométrica, constituye el álgebra del ábaco un capítulo central de su primer volumen. Complétese lo que ahí se dice con la lectura directa del famoso texto de "Fibonacci" (*Fibonacci's Liber Abaci*).

Con granos, conchas, piedras, tabletas o nudos, el cálculo se ha valido de los medios más dispares. Griegos y romanos desarrollaron ábacos; en el caso de los segundos, los cálculos operados con el ábaco se escribían en números romanos. En su forma más conocida, el ábaco consta de un bastidor de madera recorrido por alambres que portan insertadas cuentas. Los hindúes y los árabes empleaban números escritos en un sistema de posición e idearon métodos para las operaciones básicas, que no precisaban el ábaco. Así aprenden hoy las cuatro reglas los niños. En la Edad Media esos nuevos procedimientos de escritura se denominaban algoritmos, para distinguirlos de los cálculos realizados con el ábaco. Los contemporáneos de Leonardo denominaban *abaco* a esos procedimientos de cálculo escritos, el álgebra y la matemática práctica. Un *maestro d'abbaco* era la persona que calculaba directamente con los números arábigos. Los mercaderes italianos difundieron así la nueva matemática y sus métodos, hacia el sur, por la cuenca mediterránea, y hacia el norte, por Alemania, a través de los "cosistas" (una corrupción del italiano *cosa*, la incógnita del álgebra).

El "Libro sobre el cálculo" o *Liber Abaci*, sin duda uno los textos capitales de la matemática de todos los tiempos, merece tal puesto de honor no tanto por su estricto contenido cuanto por facilitar la difusión en Occidente del sistema hindú de numeración y los métodos algebraicos. Su autor, Leonardo Pisano (*ca.* 1170-*ca.* 1240), había iniciado su formación en Bugia, un enclave comercial establecido por la ciudad de Pisa en la costa beréber de Africa. La completó en sus viajes de negocios y estudiando en Egipto, Siria, Provenza y Bizancio. Se familiarizó con los *Elementos* de Euclides y el método matemático de la definición, el teorema y la prueba. Aprendió

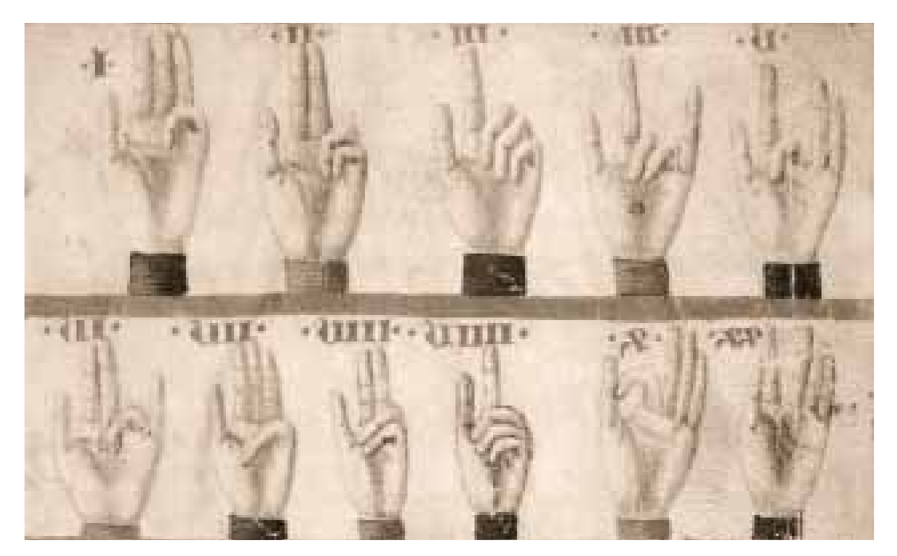


Ilustración del *Liber Abaci*

de los árabes la numeración hindú y su sistema decimal, así como algoritmos para las operaciones matemáticas. Conoció el álgebra de al-Khwarizmi. Aunque los números arábigos habían llegado a Europa en la segunda mitad del siglo X, vía España, su uso no estaba generalizado en tiempos de Leonardo. Consciente de su importancia para el comercio de sus compatriotas, se decidió a escribir esta obra enciclopédica.

El *Liber abaci*, una obra impresionante sobre aritmética, álgebra y matemática aplicada, se apoya en el fundamento teórico de la matemática de Euclides. Se establecen métodos generales mediante el uso del álgebra geométrica principalmente en el libro II de los *Elementos*. Leonardo vuelve al libro X para buscar un fundamento a los números irracionales. Ofrece el pisano pruebas de métodos viejos, métodos adquiridos del mundo árabe y contribuciones originales suyas, amén de incluir métodos no algebraicos establecidos en la Edad Media para la solución de problemas, al tiempo que les da legitimidad matemática. Introduce así operaciones de comprobación por la prueba del nueve, varias reglas de proporción y métodos de posición falsa singular o doble.

La obra de Fibonacci apareció en 1202, reelaborada en 1228. Aunque su autor declara que pretende con ella presentar el sistema de numeración hindú en Italia, el texto trasciende ese objetivo. Leonardo escribió otros libros sobre matemática: *Liber quadratorum* (1255), *Practica geometriae* (1223), *Flos* y *Epistola ad Magistrum Theodorum* (1225).

Igual que impulsó el desarrollo de la ciencia en el umbral y apogeo de la Edad Media, la lógica será también el motor del nuevo giro del saber en el tránsito del Medievo al Humanismo (*John Buridan* y *Subjekt und Metaphysik*). Jean de Buridan (*ca.* 1300-1361) constituye el gozne de esa postrera articulación. Nacido en Béthune, se educó en la Universidad de París. Pero, caso un tanto excepcional, toda su carrera académica transcurrió en la facultad de artes, antesala de las llamadas facultades mayores (medicina, leyes y teología). Entre su extensa producción sobre lógica y filosofía natural, sobresalen las *Summulae de dialectica*, una revisión y comentario a las *Summulae logicales* de Pedro Hispano, y el *Tractatus de consequentiis*, un tratado sobre los modos de inferencia. Dedicó también glosas breves (*expositiones*) y estudios críticos más largos (*quaestiones*) a las obras aristotélicas. Pero no se limitó al *Organon*. Sus lecciones abarcaban la *Metafísica, Físicos, De coelo, De anima, Parva naturalia* y *Etica de Nicómaco*. La verdad es que su filosofía empieza por la lógica (*ars artium*), procede a través de la metafísica y llega a la filosofía natural, representada por la ciencia subalterna de la psicología, para terminar en la ética.



Jean de Buridan

Suele adscribírsele a la corriente nominalista. Tesis matizada por Zupko. Lo mismo que la mayoría de los nominalistas medievales, Buridan proponía que los universales no tenían existencia real, salvo en cuanto ideas por medio de las cuales la mente concibe "muchas cosas indiferentemente". Difiere de Occam en su exposición del movimiento, tiempo y cantidad (apelando, en el último caso, a las formas cuantitativas para explicar la impenetrabilidad de los cuerpos). En filosofía natural, se le reconoce la introducción del concepto no aristotélico de "impetus", o fuerza impresa, para explicar el movimiento de los proyectiles.

Pero más que los contenidos de la física o filosofía de la naturaleza Buridan insta un cambio en el método de conocer. De hecho, el discurso de las *Summulae* es el discurso de la filosofía. Y ésta empieza por una disquisición sobre el lenguaje; gramática y dialéctica no son disciplinas especulativas, sino prácticas, que muestran su eficacia y revelan su contenido en los textos científicos y metafísicos. Pese a elevar la dialéctica o lógica a la categoría de ciencia del discurso, en Buridan se disuelve la distinción clásica entre *logica docens*, o teorética, y *logica utens*, o aplicada. En la lógica justamente incluye la partición aristotélica de las ciencias, que responde a una ascendente inteligibilidad en su escalonamiento, que partía de la física o filosofía natural (que estudiaba lo sensible, imaginable e inteligible), atravesaba la matemática (que se ocupaba de lo imaginable e inteligible) y culminaba en la metafísica (puramente inteligible). Pero su aportación genuina, verdadero quicio de la *logica moderna*, estriba en la doctrina de la suposición. El concepto nos remite a lo que subyace bajo los términos de un enunciado. (Los historiadores de la lógica acostumbran distinguir entre una suposición propia y modos de suposición personal; asimilan la primera a la teoría de la referencia y la segunda, al análisis de la cuantificación.) En cuanto propiedad lógica de los términos, la suposición es complementaria de la significación.

Aunque Buridan está convencido de que el intelecto humano se encuentra, por naturaleza, ordenado para asentir lo que es cierto, en determinados textos parece adelantarse a una suerte de propuesta de conocimiento *a priori*, kantiano *avant la lettre*, un aspecto extensamente estudiado por Gerhard Krieger. En cualquier caso, la metafísica de Buridan se asienta sobre el sujeto, entendido como la conciencia del yo.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Faroltesta

En mis años de tahúr, entre los 8 y los 12, me dediqué a toda clase de juegos de azar —ruleta, póquer, blackjack— y a cualquier otro donde la puesta no pasara de tres céntimos. Uno de mis favoritos, no obstante, era el que llamábamos "faroltesta". Cada jugador roba, sin mirarla, una carta de un mazo bien barajado y la sostiene sobre la frente a la vista de los demás. Dicho de otro modo, los jugadores ven las cartas de todos los demás, pero no la propia. Gana la carta más alta. El as tiene el valor máximo, y como los palos no importan, son posibles los empates.

Este problema trata de la posibilidad de inferir información relativa a las cartas que cada cual sostiene a partir de lo que los jugadores manifiestan. Supondremos, para mayor concreción, que los jugadores sean tres. Carolina es siempre la primera en hablar, seguida por David y después por Juan; luego, el ciclo recomienza. Cada jugador ha de expresar una de las aseveraciones citadas en la columna de abajo a la derecha. Hemos de suponer que los jugadores poseen una lógica perfecta y que la información que revelan es, exclusivamente, la contenida en estas frases; además, en todo momento declaran la afirmación más fuerte que les es posible; es decir, eligen el enunciado que, siendo verdadero, ocupe la posición más alta en la lista.

Como problema preliminar, supongamos que Carolina dice, "No lo sé". Después David dice, "Yo pierdo", y Juan añade "Yo pierdo". Al oír todo esto, nosotros (y también los jugadores) nos damos cuenta de que Carolina ha de tener un as y los demás no. Para comprender por qué, véase la ilustración.

He aquí los problemas: ¿Qué se puede deducir en los siguientes supuestos?

Juego 1: Carolina dice, "No lo sé". Después David dice, "No gano", y finalmente Juan afirma: "Yo gano".

Juego 2: Carolina dice, "No lo sé". David dice entonces, "No gano", y Juan prosigue: "Yo empato como ganador".

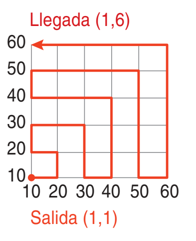
Juego 3: Carolina dice, "No lo sé". David dice entonces, "No gano", y después Juan dice "No gano".

Juego 4: Carolina dice, "No lo sé". David dice a continuación, "No lo sé", y Juan añade "No lo sé". Carolina, al comenzar la segunda ronda, responde "Yo pierdo". ¿Sabrá usted predecir lo que dirán a continuación David y Juan?

Juego 5: Carolina, David y Juan dicen cada uno, llegado su turno, "No lo sé". En una segunda ronda, vuelven a decir todos "No lo sé". En la tercera ronda, Carolina y David dicen "No lo sé", pero Juan dice, "Yo gano". ¿Qué carta tiene Juan, y cuáles podría él estar viendo?

Solución del problema del mes pasado:

Podemos ver una buena solución del problema de la parilla en la ilustración. La duración total del viaje es de 12 horas y 6 minutos.

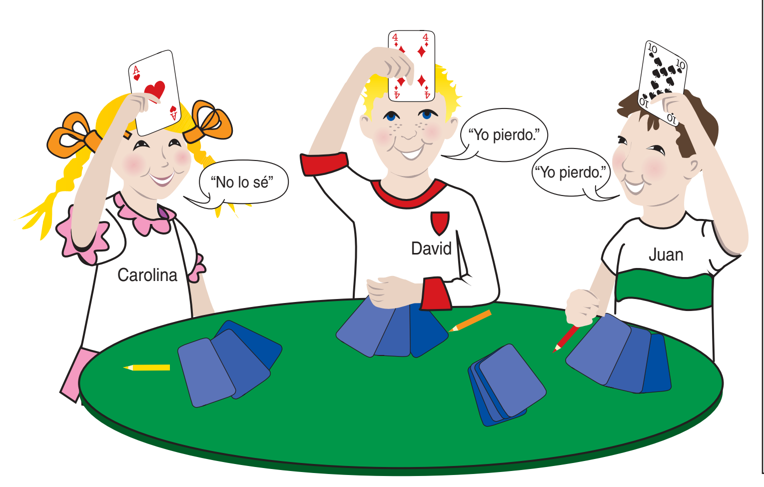


Solución en la Red

Puede verse una solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es

SOLUCION DEL PROBLEMA PRELIMINAR

Incluso sin ver las cartas de los jugadores, aquí representados, se podría saber, por lo dicho, que Carolina tiene un as y los otros no. Si Carolina hubiera visto un as, sabría que no es la única ganadora, y diría "No gano". Pero al no ver un as, y careciendo de información sobre su propia carta, tiene que decir "No lo sé". Su incertidumbre les dice a los chicos que ninguno de ellos tiene un as. Pero como ven que Carolina tiene un as, ambos se dan cuenta de que pierden.

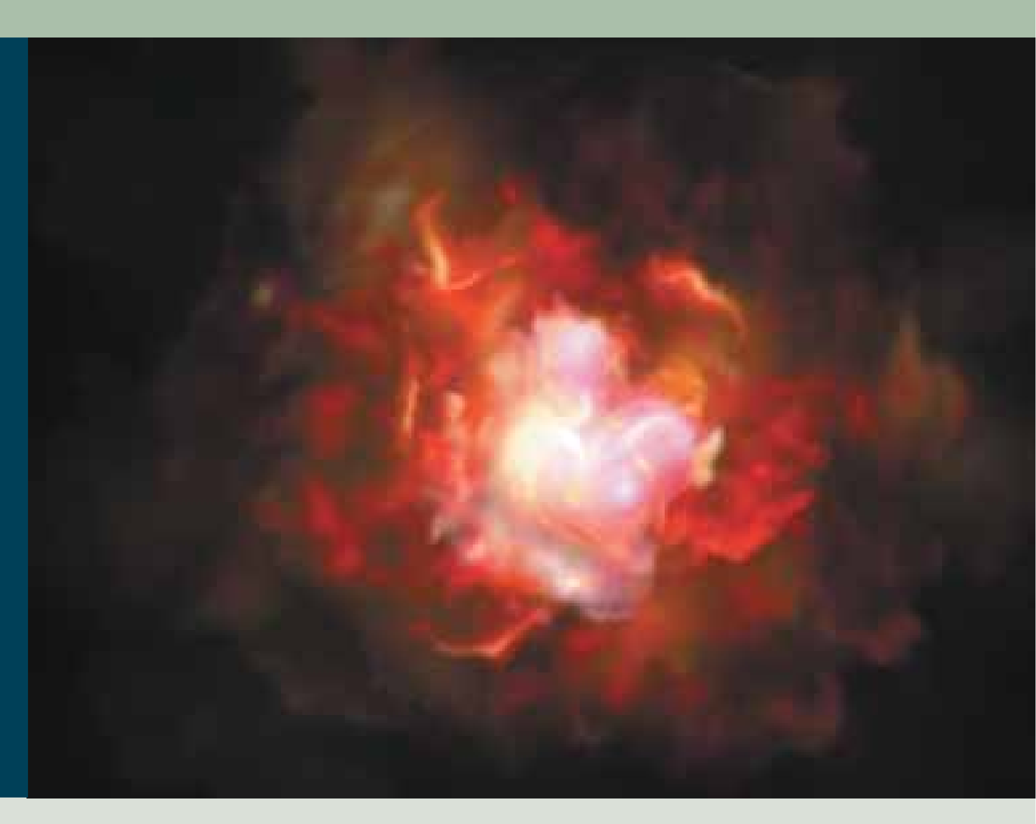


DECLARACIONES DEL JUEGO

"Yo gano". (Tengo una carta más alta que los demás.)
"Yo pierdo". (Alguno de los demás tiene una carta más alta que la mía.)
"Empato como ganador". (Al menos otro jugador y yo empatamos con la carta más alta.)
"No gano". (O bien pierdo, o bien empato como ganador.)
"No pierdo". (O bien gano, o empato como ganador.)
"No lo sé".

CORNELIA BLIK





EL MITO DEL INICIO DEL TIEMPO,
por Gabriele Veneziano

Según la teoría de cuerdas, la gran explosión no fue el origen del universo, sino tan sólo el resultado de la evolución de un estado preexistente.

VUELVE FREUD, por Mark Solms

Los neurólogos están cayendo en la cuenta de que sus descripciones biológicas del cerebro resultan más coherentes si se las integra en las teorías psicológicas que Freud enunció hace un siglo.



EL TORIO, COMBUSTIBLE PARA LA ENERGIA NUCLEAR
por Mujid S. Kazimi

Un método poco trillado podría un día evitar que se hicieran bombas con el combustible usado.

LA PRUEBA DEL NUEVE, por Michel Ballieu

Los pitagóricos y los alumnos de primaria, los matemáticos árabes y los algebristas del Renacimiento han aplicado la prueba del nueve. ¿Es una receta mágica?

MICROARN,
por César Llave

El descubrimiento de unas moléculas de ARN diminutas en las células eucariotas ha modificado de raíz nuestro conocimiento sobre los mecanismos de regulación de la expresión génica.

